



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.18.18.44-TDI

**TRAJETÓRIA DAS MUDANÇAS DE USO E
COBERTURA DA TERRA EM ESTIMATIVAS DE
PERDA DE SOLO EM UMA REGIÃO DE EXPANSÃO
AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA: A BACIA DO RIO
CURUÁ-UNA, PA**

Lidiane Cristina Oliveira Costa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Drs. Maria Isabel Sobral
Esacada, e Adriana Gomes
Affonso, aprovada em 30 de
julho de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RFKPAP>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.18.18.44-TDI

**TRAJETÓRIA DAS MUDANÇAS DE USO E
COBERTURA DA TERRA EM ESTIMATIVAS DE
PERDA DE SOLO EM UMA REGIÃO DE EXPANSÃO
AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA: A BACIA DO RIO
CURUÁ-UNA, PA**

Lidiane Cristina Oliveira Costa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Drs. Maria Isabel Sobral
Esacada, e Adriana Gomes
Affonso, aprovada em 30 de
julho de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RFKPAP>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Costa, Lidiane Cristina Oliveira.

C823t Trajetória das mudanças de uso e cobertura da terra em estimativas de perda de solo em uma região de expansão agrícola na Amazônia: A bacia do Rio Curuá-Una, PA / Lidiane Cristina Oliveira Costa. – São José dos Campos : INPE, 2018.
xx + 102 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.18.18.44-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadoras : Drs. Maria Isabel Sobral Escada, e Adriana Gomes Affonso.

1. Uso e cobertura da terra. 2. Perda de solo. 3. Trajetória.
I.Título.

CDU 528.8:3332.3(811.5)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

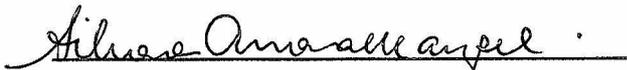
Aluno (a): **Lidiane Cristina Oliveira Costa**

Título: "TRAJETÓRIA DAS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA EM ESTIMATIVAS DE PERDA DE SOLO EM UMA REGIÃO DE EXPANSÃO AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA: A BACIA DO RIO CURUÁ-UNA, PA"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Sensoriamento Remoto

Dra. Silvana Amaral Kampel

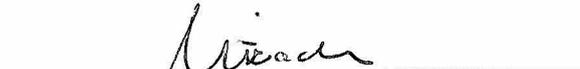


Presidente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Maria Isabel Sobral Escada



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Adriana Gomes Affonso

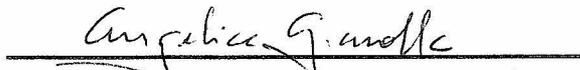


Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Angélica Giarolla



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 30 de julho de 2018

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Mario Valério Filho



Convidado(a) / UNIVAP/IP&D / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 30 de Julho de 2018

*“O que nós vemos das coisas são as coisas.
Porque veríamos nós uma coisa se houvesse outra?
Porque é que ver e ouvir seria iludirmo-nos
Se ver e ouvir são ver e ouvir?
O essencial é saber ver,
Saber ver sem estar a pensar,
Saber ver quando se vê,
E nem pensar quando se vê,
Nem ver quando se pensa.
Mas isso (triste de nós que trazemos a alma vestida!),
Isso exige um estudo profundo,
Uma aprendizagem de desaprender
E uma sequestração na liberdade daquele convento
De que os poetas dizem que as estrelas são as freiras eternas
E as flores as penitentes convictas de um só dia,
Mas onde afinal as estrelas não são senão estrelas
Nem as flores senão flores,
Sendo por isso que lhes chamamos estrelas e flores”*

O Guardador de Rebanhos, Alberto Caeiro

Ao meu maior incentivador, professor, amigo, confidente, conselheiro, àquele que me ensinou que o mais importante é estar bem e feliz, àquele que esteja onde estiver sempre estará comigo, Vô Rico. (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

"*Nenhum homem é uma ilha, isolado em si mesmo*" (John Donne) e com isso tenho muito a agradecer a todos que colaboraram de alguma forma nesse processo.

A minha família por todo o incentivo e apoio, sou grata por tê-los em minha vida, por poder contar com vocês e pelos ótimos momentos que sempre temos quando nos reunimos. Agradeço às mulheres da minha vida minha avó, minha tia e de forma em especial a minha mãe que acompanhou bem de pertinho cada desespero, alegria, meus momentos de humor oscilando, ajudando sempre da melhor forma que podia.

As minhas orientadoras todo o meu respeito, consideração e gratidão! Obrigada por compartilharem seu conhecimento, pela dedicação, pelas cobranças, por acreditarem e por me ajudarem tanto nesse amadurecimento acadêmico durante o período de mestrado.

Aos meus amigos da sala 53, Anita, Vini, Ani e Rê, vocês são incríveis!!! Obrigada pelas dicas, pelos socorros, pelas dicas, conversas, pelos momentos de discussões, pelas risadas, foram tantos momentos juntos, tanta parceria que faltariam palavras para descrever tudo. E obrigada Juju, sem dúvidas você contribuiu para que o primeiro período fosse mais leve!!!

A todos do grupo de pesquisa LISS (Laboratório de Investigação em Sistemas Sócio-Ambientais), aprendi muito com vocês! Agradeço em especial Silvana e Miguel pela acolhida ao grupo, pelas contribuições no meu amadurecimento acadêmico e por estarem sempre dispostos ajudar.

À 2ªC, que turma!!! Valeu cada momento, obrigada pelas trocas de conhecimento, por fazerem por vezes os períodos mais tensos ficarem mais leves e propiciarem momentos como o com a Judite. Em especial Maurano e Mikha.

Agradeço as minha amigas Lê, Jacque, Ste e Anita também por ficarem mais do que nunca nesses últimos dois anos me ouvindo falar de dissertação, dissertação e dissertação, por ouvirem as minhas lamentações e pelos momentos que conseguimos passar juntas, sempre bom estar com vocês.

Aos docentes do INPE por transmitirem seus conhecimentos. A todo quadro de funcionários do INPE, por vezes um "Bom dia" animado fez a diferença, sem contar no pessoal da portaria a noite que parecia ver o cansaço estampado no

rosto e sempre vinham conversar e oferecer um café enquanto aguardava para ir embora.

Agradeço a Alessandra Gomes e ao Projeto TerraClass, por fornecerem os dados do TerraClass pretérito para o uso neste trabalho.

Ao INPE, pela infraestrutura cedida, ao BNDS pelo financiamento concedido aos trabalhos de campo e a CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço a Angélica por toda colaboração ao longo do desenvolvimento do meu trabalho e também a Grasiela, aprendi muito com vocês!

RESUMO

Políticas públicas realizadas nas décadas de 1960 e 1970 com o objetivo de integrar a região amazônica ao sudeste do Brasil resultaram em uma migração intensiva e no desenvolvimento de grandes projetos, que resultou na conversão de vastas áreas de cobertura florestal em diferentes tipos de uso e cobertura da terra (UCT). As mudanças de UCT podem afetar a biodiversidade, aumentar as emissões de gases de efeito estufa e afetar a qualidade da água através da erosão, sedimentação e eutrofização. A identificação e o monitoramento das áreas mais suscetíveis às mudanças de UCT poderiam apoiar políticas públicas e planejamento territorial. Seguindo essa abordagem, o objetivo deste estudo foi avaliar as taxas de perda de solo na Bacia do Rio Curuá-Una, sudoeste do Pará, de 1984 a 2014. Essa região tem sofrido grandes alterações na cobertura florestal desde a década de 70 e, mais recentemente, sofreu o impacto da expansão do agronegócio, que ocorreu preferencialmente nas áreas de planalto. Diferentes tipos de modelo têm sido utilizados para estimar perda de solos. Nesse estudo, utilizamos o modelo USLE e diferentes tabelas de referência para estimar fatores associados à proteção exercida pela cobertura da terra e à erodibilidade. As trajetórias das taxas de perda de solo e as mudanças de UCT foram identificadas, e uma análise combinada das mesmas foi realizada. Os resultados mostraram que as taxas de perda de solo na Bacia de Curuá-Una aumentaram 243% de 1984 a 2014, com as maiores incertezas associadas às mudanças de UCT e os fatores de erodibilidade. As trajetórias da UCT mostraram uma maior remoção da cobertura vegetal no município de Uruará, que possui relevo acidentado e cobertura de pastagens dominantes, e nos municípios de Belterra, Mojuí dos Campos e Santarém, em uma área de cultivo anual plana. Nestas áreas, ocorreram maiores taxas de perda de solo próximo à barragem de Curuá-Una, indicando possíveis impactos nos corpos d'água. A análise revelou padrões importantes de perda de solo e vegetação que devem ser considerados no planejamento ambiental territorial e poderiam ser usados como um guia para a definição adequada do uso da terra que busca solo, água, conservação florestal.

Palavras-chave: Uso e Cobertura da terra. Estimativa de perda de solo.
Trajetória.

**TRAJECTORIES OF LAND USE AND LAND COVER CHANGES IN SOIL
LOSS RATES IN A AGRIBUSINESS EXPANSION AREA IN THE AMAZON:
THE CURUÁ-UNA BASIN, PA.**

ABSTRACT

Public policies carried out in the 1960s and 1970s aiming to integrate the Amazon region into south-eastern Brazil resulted in an intensive migration and the development of huge projects, which triggered the conversion of vast areas of forest cover into different types of land cover and land use (LCLU). Changes in LCLU can affect biodiversity, increase greenhouse gas emissions, and impact water quality through erosion, sedimentation and eutrophication. The identification and monitoring of the most susceptible areas to changes in LCLU could support public policies and territorial planning. Following this approach, the objective of this study was to evaluate the soil loss rates at Curuá-Una River Basin, southwest of Pará state, from 1984 to 2014. Since 1970s, the forest in this area has been impacted by human activity, and recently, also by agribusiness expansion, which occurred preferentially in plateau areas. Different models have been used to estimate soil loss rates. In this study, the Universal Soil Loss Equation (USLE) was used with different data sources of erodibility and LCLU values. LCLU and soil loss rates trajectories were identified, and a combined analysis of them was carried out. Results showed that soil loss rates in the Curuá-Una Basin have increased by 243% from 1984 to 2014, with the highest uncertainties associated with the LCLU and the erodibility factors. The LCLU trajectories showed a greater removal of vegetation cover in Uruará municipality, which has a rugged relief and pastureland cover dominant, and in Belterra, Mojuí dos Campos and Santarém municipalities, on a flatted annual crop area. In these areas, occurred increased soil loss rates near Curuá-Una dam indicating potential impacts in the water bodies. The analysis revealed important patterns of soil and vegetation loss that should be considered in territorial environmental planning and could be used as a guide for adequate land use definition that seeks soil, water, forest conservation.

Keywords: Land cover and land use. Soil Loss Rates. Trajectories.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1: Área de estudo.....	19
Figura 3.2: Média da precipitação mensal para os anos de 1996 a 2006 na bacia do Curuá-Una.	20
Figura 4.1: Diagrama metodológico.	25
Figura 4.2: Correspondência entre os dados do TerraClass e as categorias utilizadas na pesquisa, obtidas com o refinamento e/ou agrupamento de classes.do TerraClass.....	31
Figura 4.3: Exemplo de aplicação da operação de classe majoritária.....	33
Figura 4.4: Exemplo de valor correspondente à mudança.	35
Figura 4.5: Exemplo de trajetória de mudança de uso e cobertura da terra para os tempos: T1, T2, T3, T4 e T5.	36
Figura 4.6: Divisão do Brasil em regiões homogêneas, em termos de características da precipitação.	39
Figura 4.7: Mapa de Solos	40
Figura 5.1: Extração de drenagem e delimitação da bacia	51
Figura 5.2: Mapa de Uso e Cobertura da Terra de 1984.....	52
Figura 5.3: Matriz de confusão do mapeamento de 1984	53
Figura 5.4: Kappa dos Classificadores <i>Boosting</i>	54
Figura 5.5: Matriz de confusão da Validação	54
Figura 5.6: Mapas de Uso e Cobertura da Terra para os anos de 1991, 2000, 2008 e 2014.	56
Figura 5.7: Distribuição da Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo e Agricultura nas áreas desmatadas para a Região do Polo dos Grãos.....	59
Figura 5.8: Produção de Soja e Milho na região do Polo dos Grãos.....	60
Figura 5.9: Distribuição da Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo e Agricultura nas áreas desmatadas para o município de Uruará.....	61
Figura 5.10: Distribuição da Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo e Agricultura nas áreas desmatadas para o município de Placas.	62

Figura 5.11: Trajetória de Uso e Cobertura da Terra	64
Figura 5.12: Fatores R, S e L.	67
Figura 5.13: Mapas de Taxas de Perda de Solo e Incertezas.....	69
Figura 5.14: Mapas de uso da terra e da estimativa de perda de solo em uma área de pastagem no entorno da cidade de Uruará, na rodovia Transamazônica.....	73
Figura 5.15: Exemplo sobre influência dos fatores em Placas.	74
Figura 5.16: Distribuição do Padrão de Temporal de Perda de Solo.	75
Figura 5.17: Análise combinada dos principais padrões de perda do solo e trajetórias de uso e cobertura da terra.	78
Figura 5.18: Distribuição da declividade por município nas células com área de Agricultura Anual.	80
Figura 5.19: Solos das áreas de Agricultura por município	81
Figura 5.20: Trajetória de Uso e Cobertura da Terra nas áreas de Agricultura Anual	82
Figura 5.21: Mapa de áreas potenciais à expansão agrícola.	84
Figura 5.22: Registros de campo de novas frentes de desmatamento com Agricultura Anual em Uruará 2017.	85
Figura 5.23: Registros de campo de Agricultura Anual mecanizada em Belterra 2017.	85

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1: Descrição das classes do mapa temático do TerraClass.	9
Tabela 4.1: Dados a serem utilizados.	22
Tabela 4.2: Relação das Imagens Landsat	23
Tabela 4.3: Ordenamento das classes quanto à contribuição para os processos de perda de solo.....	34
Tabela 4.4: Índice da trajetória de mudança de uso e cobertura da terra no período de 1984 à 2014.	37
Tabela 4.5: Fator K baseado em referências do RADAM e da Amazônia.....	41
Tabela 4.6: Fator K baseado em referências utilizadas para o Brasil e para o estado de São Paulo.	42
Tabela 4.7: Classes de uso e cobertura da terra.....	44
Tabela 4.8: Combinações para o cálculo da USLE	45
Tabela 4.9: Tipologia do Padrão Temporal de Perda de Solo.....	47
Tabela 5.1: Reclassificação do Mosaico de Ocupação	55
Tabela 5.2: Cobertura da Terra na Bacia do Curuá-Una.....	58
Tabela 5.3: Uso e Cobertura da Terra nas Áreas Desmatadas na Bacia do Curuá-Una.....	58
Tabela 5.4: Dados de Produção Agrícola Municipal.....	63
Tabela 5.5: Média da taxa de perda de solo por município.	71

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Conceitos de uso e cobertura da terra.....	7
2.2 Programa de monitoramento de uso e cobertura da terra na Amazônia	8
2.3 Extração de bacias e redes de drenagem a partir de dados SRTM	10
2.4 Processamento de imagens para o mapeamento do uso e cobertura da terra.....	11
2.4.1 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)	12
2.4.2 Algoritmos para classificação de dados de uso e cobertura da terra ..	13
2.5 USLE – Equação Universal de Perda de Solo.....	14
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Área de estudo	19
3.2 Materiais utilizados	21
3.3 Procedimentos metodológicos.....	23
3.3.1 Delimitação da bacia	25
3.3.2 Mapeamento do uso e cobertura da terra	26
3.3.2.1 Pré-processamento das imagens	27
3.3.2.2 Máscara do desflorestamento.....	27
3.3.2.3 Classificação do uso e cobertura da terra.....	28
3.3.2.4 Reclassificação do TerraClass.....	30
3.3.2.5 Trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra	32
3.3.3 Estimativa de perda de solo (USLE)	37
3.3.3.1 Fator R.....	38
3.3.3.2 Fator K.....	39
3.3.3.3 Fatores L e S	42
3.3.3.4 Fator C e P.....	43
3.3.3.5 Estimativa de perda de solo.....	45
3.3.3.6 Mapa de incerteza	46

3.3.3.7	Padrões temporais de perda de solo	46
3.4	Análise integrada das trajetórias de perda de solos com as trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Delimitação da bacia do Curuá-Una	49
4.2	Mapeamento de uso e cobertura da terra.....	51
4.2.1	Mapeamento 1984	52
4.2.2	Reclassificação da classe mosaico de ocupações.....	53
4.2.3	Uso e cobertura da terra na bacia do Curuá-Una	55
4.2.4	Trajectoria de mudança de uso e cobertura da terra	63
4.3	Estimativa de perda de solo.....	66
4.3.1	Fatores USLE.....	66
4.3.2	Estimativa de perda do solo e mapa de incerteza.....	68
4.3.3	Padrões temporais de perda de solo.....	74
4.4	Análise combinada da trajetória de uso e cobertura da terra e dos padrões temporais de perda do solo	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

O Bioma Amazônia possui aproximadamente 6 milhões de km², sendo que 67% está em território brasileiro distribuídos nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins (PROBIO, 2004). Nas décadas de 60 e 70, ocorreu a intensificação da ocupação da região Norte devido às políticas implementadas pelo Governo Federal que visavam o desenvolvimento e a integração da Amazônia às demais regiões do Brasil. Nesse período, diversas iniciativas favoreceram a colonização e induziram o fluxo migratório na região, destacando-se a construção de rodovias, como a Transamazônica (BR-230), Cuiabá-Santarém (BR-163) e Belém-Brasília (BR-153), a implantação de projetos agropecuários, a construção de hidrelétricas, além da oferta de subsídios e incentivos fiscais (AB'SABER, 1989; BECKER, 2004).

Esse processo de ocupação da Amazônia, que ocorreu de forma acelerada e muitas vezes desordenada, resultou na conversão de grandes áreas de cobertura florestal, seja por desmatamento ou por degradação florestal, para diferentes tipos de uso da terra. Nos anos mais críticos, a remoção sistemática das florestas atingiu taxas de 29.059 km² (1995) e 27.772 km² (2004) (INPE, 2015). As consequências ambientais desse processo são diversas, como a redução da evapotranspiração, diminuição de chuvas em alguns locais, aumento da emissão de gases de efeito estufa e perda da biodiversidade (FEARNSIDE, 2005, 2007). Dado esse contexto, programas e ações que visam o monitoramento das alterações da cobertura florestal, e dos demais usos da terra na Amazônia são fundamentais para a proposição de políticas públicas que buscam compatibilizar o desenvolvimento e a manutenção da floresta.

No final dos anos 80, com a crescente preocupação com o desmatamento na Amazônia, uma das iniciativas importantes apoiada pelo governo brasileiro foi a criação do programa de monitoramento da floresta Amazônica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujo objetivo era realizar o cálculo anual de perda de área de cobertura florestal primária na Amazônia Legal por

meio do mapeamento da dinâmica do desmatamento por corte raso. Desde então, dados de sensoriamento remoto e o emprego de técnicas de processamento digital de imagem são utilizadas para o mapeamento do desmatamento, a partir do qual se estima a taxa de desmatamento anual na Amazônia Legal. Esses dados fazem parte do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia por Satélites (PRODES). Em 2008, o INPE passou a realizar também o mapeamento bianual de uso e cobertura da terra em áreas desmatadas identificadas pelo PRODES, através do Projeto TerraClass. Até o presente momento, foram publicados cinco mapeamentos, para os anos de 2004, 2008, 2010, 2012 e 2014. A identificação das classes de cobertura da terra nas áreas desmatadas auxilia no entendimento das dinâmicas do uso e cobertura da terra da Amazônia Legal, especialmente no que tange a conversão florestal.

Conhecer as dinâmicas de uso e cobertura da terra é fundamental para propor ações que visem o planejamento e ordenamento territorial, sendo o estudo e a gestão dos recursos hídricos, temas importantes que se relacionam diretamente com esses processos. Nesse sentido, diversos estudos têm sido realizados procurando entender como essas dinâmicas interferem em processos naturais relacionados com os fluxos hidrológicos e com a qualidade da água. Bertoni e Lombardi Neto (1985), por exemplo, apontam a cobertura vegetal como um agente natural de proteção contra a erosão e apresentam para o estado de São Paulo valores mais baixos de perda de solo de $0,004 \text{ t.ano}^{-1}$ em áreas de mata (floresta) e valores bem mais altos, de $0,4 \text{ t.ano}^{-1}$ em áreas de pastagem. Para Ashraf (2014), a conversão da cobertura florestal para outro tipo de cobertura afeta a porosidade do solo e, por consequência, a absorção da água e o escoamento superficial, ocasionando erosão, impactando o solo e podendo afetar também os corpos hídricos, tanto os aspectos hidrológicos (vazão, escoamento superficial, etc.) quanto a qualidade da água.

Nas últimas décadas, mudanças importantes na cobertura da terra ocorreram na Amazônia e também no estado do Pará. Segundo dados do PRODES, a taxa de desmatamento registrada no estado do Pará em 2004¹, foi de 8.870 km² (INPE, 2015) e, de acordo com dados do Projeto TerraClass, essas áreas foram convertidas principalmente para pastagem. Com o passar dos anos, as áreas anteriormente ocupadas pela pastagem têm sido parcial e gradativamente substituída por agricultura e vegetação secundária, esta última em menor proporção. Esse processo demonstra que a dinâmica do uso e cobertura da terra baseia-se fortemente na pecuária extensiva e atualmente na agricultura de larga escala que vem se consolidando no estado, sendo uma das principais atividades na matriz econômica do estado (ADAMI, et al., 2015; IBGE, 2017).

Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) mostram que a soja começou a ser produzida no estado do Pará na safra de 1997/98, mas que até 2001/02 a área plantada era inferior a 3 mil ha (CONAB, 2017). Em Santarém, a instalação do porto da Cargill no início dos anos 2000, favoreceu o aumento do plantio de soja na região (ESCADA et al., 2009; NERIS; PEREIRA, 2013; BARRETO, 2009). Entretanto, a expansão dessa agricultura mecanizada nos municípios de Santarém e Belterra (PA) promoveu impactos ambientais, como a destruição das matas ciliares, o desvio de cursos d'água e o assoreamento de mananciais (LEMOS et al., 2010).

Nesta região eventos importantes como a instalação da Hidrelétrica do Curuá-Una, a construção da rodovia Transamazônica e, às suas margens, a criação de projetos de assentamento do INCRA, na década de 70, intensificaram a pressão sobre a floresta. Entretanto, ainda em 1985, de acordo com relatos de Goeldi (1985) os principais usos eram associados às roças de cultivo de mandioca e banana, sobretudo nas comunidades situadas na margem esquerda da represa do Curuá-Una.

¹ Desde o início do Programa de monitoramento da Amazônia, 2004 foi o ano com maior taxa de desmatamento observado na Amazônia Legal.

Atualmente, nessa região, é possível observar diversos padrões de uso e cobertura da terra associados a diferentes atividades econômicas agropecuárias e extrativistas, em que a agricultura anual de larga escala, é observada principalmente na região do Planalto de Santarém. Em seu entorno nota-se a presença de pequenas lavouras, com uso limitado de tecnologias no processo de produção e pequenas criações de gado para consumo das próprias famílias (SOUZA, 2016).

As mudanças no uso e cobertura do solo na Amazônia podem acarretar diversas consequências ambientais, entre elas, as mudanças na qualidade da água, devido à erosão, assoreamento e eutrofização dos corpos hídricos. Sem a proteção da vegetação, o impacto da chuva no solo, somado aos impactos das atividades agropecuárias, aumenta a susceptibilidade à compactação e ao selamento superficial, diminuindo a taxa de infiltração e consequentemente aumentando o escoamento superficial, que resulta em um maior transporte de sedimentos e nutrientes para os córregos e rios (LENCASTRE, 1992).

Tendo em vista avaliar impactos da remoção da vegetação na qualidade de água, alguns estudos foram realizados na região sudoeste do Pará. O estudo de Aguiar et al. (2015) teve como objetivo avaliar o impacto da agricultura na qualidade da água nas microbacias dos municípios de Santarém e Belterra, que mostrou que as atividades antrópicas têm causado assoreamento e aporte de compostos e nutrientes aos rios da região. Os níveis de fósforo nos rios, provenientes de áreas de agricultura mecanizada e familiar, foi de 27 a 71% maior do que o dos rios de áreas de floresta (Floresta Nacional do Tapajós - FLONA Tapajós) nos períodos chuvosos. Foi observada também elevação no parâmetro de cor da água nas microbacias das áreas de cultivo mecanizado durante estação chuvosa, provavelmente relacionada com o carreamento de compostos devido ao aumento da lixiviação do solo, provocado pela falta de proteção da vegetação ripária (Aguiar, et al., 2014).

A identificação e o monitoramento das áreas mais suscetíveis às modificações do uso e da cobertura da terra auxiliam no planejamento de políticas públicas

que visam prevenir e/ou amenizar os impactos provocados por essas mudanças, dentre eles, a perda de solo. Atualmente, com a base de dados de uso e cobertura da terra da Amazônia Legal disponível pelo TerraClass (EMBRAPA; INPE, 2016) as análises de mudanças da paisagem são facilitadas. Esses dados possibilitam que estudos e abordagens que analisam o território em diferentes escalas espaço-temporais sejam realizados. Permitem observar extensas áreas em diferentes momentos, o que para a Amazônia é especialmente relevante, haja vista sua grande dinâmica e extensão territorial. Com auxílio das geotecnologias, as informações extraídas das imagens podem ser integradas a outras fontes de dados, produzindo novas informações.

Com isso, a proposta deste trabalho foi estimar a trajetória de perda de solo decorrente das mudanças de uso e cobertura da terra, ocorridas na bacia do Curuá-Una, na região Sudoeste do Pará com o uso de um modelo USLE- Equação Universal de Perda de Solo, no período de 1984 a 2014, com dados de sensoriamento remoto, de campo e de literatura integrados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Adicionalmente, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Gerar um mapa de trajetórias de mudança do uso e cobertura da terra baseado em uma tipologia pré-definida para os anos 1984, 1990, 2000, 2008, 2014;
- b) Estimar a perda de solo e incertezas, através da aplicação do modelo da equação USLE, para os anos 1984, 1990, 2000, 2008, 2014;
- c) Gerar um mapa de trajetórias de perda de solos baseado em uma tipologia pré-definida para os anos 1984, 1990, 2000, 2008, 2014;
- d) Avaliar de forma combinada o padrão espaço-temporal de perda de solos comparado com as trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra no período de 1984 a 2014.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, são apresentados alguns tópicos, conceitos e a literatura associada aos temas dessa dissertação, para fundamentar a metodologia proposta neste trabalho. Conceitos de uso e cobertura da terra, bem como técnicas de processamento de imagens utilizadas pelos Sistemas de monitoramento do INPE para mapeamento de uso e cobertura da terra, são apresentados. São apresentadas também técnicas para delimitação de bacia e extração de drenagem com dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que foram utilizadas para delimitar a área de estudo deste trabalho. A última seção apresenta o modelo USLE, composto por seis fatores, utilizado neste trabalho para realizar a estimativa de perda de solos na área da bacia delimitada.

2.1 Conceitos de uso e cobertura da terra

Os conceitos de uso e cobertura da terra por vezes são ignorados ou confundidos, dificultando a distinção entre diferentes categorias de uso e cobertura da terra (LEPERS et al., 2005; COMBER, 2008; COMBER et al., 2007). Durante parte do século XX, os mapas eram produzidos com base em relatórios de pesquisa de campo, e as diferentes formas de apropriação do espaço eram espacialmente representadas (FISHER, 2005). A partir da década de 70, com o advento das geotecnologias e a disponibilidade cada vez maior de dados de sensoriamento remoto, tem-se uma ampla difusão de inventários de cobertura da terra (COMBER et al., 2007).

Por definição, a cobertura da terra refere-se ao estado biofísico da superfície terrestre, possível de ser inferido, por exemplo, via dados de sensoriamento remoto, enquanto que o uso da terra está associado à maneira nas quais os elementos biofísicos da superfície da terra são utilizados (manejados) e/ou ao propósito para o qual esses elementos são utilizados (MEYER; TURNER, 1994).

Vegetação, superfícies construídas, e corpos d'água, são alguns exemplos de cobertura da terra, enquanto turismo, uso residencial e conservação, são exemplos de usos da terra (MEYER; TURNER, 1994). Contudo, uma mesma cobertura pode ter mais de um tipo de uso, como ocorre na Flona Tapajós, que é uma unidade de conservação, cuja cobertura predominante é a cobertura florestal e tem usos múltiplos que coexistem em seu interior, tais como: extrativismo, ecoturismo e pesquisa (ICMbio, 2017). Diferentemente do uso, dois tipos de cobertura não podem ocupar o mesmo espaço simultaneamente, ou seja, coberturas não se sobrepõem entre si no tempo e espaço (COMBER, 2008). Entretanto, duas coberturas podem ter o mesmo uso, como é o caso das áreas agrícolas que podem apresentar diferentes estágios em uma mesma região, com áreas plantadas, colhidas e áreas em pousio (solo exposto).

Neste trabalho iremos utilizar o termo uso e cobertura da terra, conjuntamente, pois a base de dados utilizada do TerraClass compreende categorias tanto de uso como de cobertura da terra, como áreas agrícolas (uso) e floresta (cobertura). Para a estimativa de perda de solos, a cobertura do solo é um dos elementos de análise mais importante, por ser considerado como um fator de proteção, entretanto, o dado de uso da terra é comumente utilizado, pois pode-se inferir a partir dele, quais os tipos de cobertura estão envolvidos, como é o caso da agricultura, em que as práticas agrícolas implicam na geração de diferentes coberturas associadas ao ciclo das culturas em questão.

2.2 Programa de monitoramento de uso e cobertura da terra na Amazônia

No final dos anos 80, iniciou-se o projeto PRODES, que estima as taxas anuais de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal. A estimativa é realizada anualmente baseada em imagens do satélite da série Landsat ou de sensores com características similares. Grande parte das imagens é adquirida no período entre julho a setembro, que corresponde ao período de menor taxa de cobertura de nuvem na região. A área mínima de mapeamento do PRODES é de 6,25 ha (INPE, 2013).

E por uma demanda governamental, a partir de 2008, o INPE em conjunto com a EMBRAPA inicia o Projeto de Mapeamento das Classes de Uso da Terra na Amazônia –TerraClass. O mapeamento do TerraClass tem periodicidade bianual e se propõe a identificar doze diferentes classes de uso e cobertura conforme descrição da Tabela 2.1, além das classes Floresta, Não Floresta, Hidrografia e desmatamento observado no ano da produção do mapa que são oriundas do PRODES. Com os dados gerados pelo TerraClass disponíveis em diferentes datas, é possível analisar a dinâmica de uso e cobertura da Amazônia Legal Brasileira nas áreas desmatadas.

Tabela 2.1: Descrição das classes do mapa temático do TerraClass.

Classe	Definição TerraClass
Floresta	Área de floresta primária, da Amazônia Legal não alterada, também utilizada pelo projeto Prodes.
Vegetação Secundária	Áreas que, após a supressão total da vegetação florestal, encontram-se em processo avançado de regeneração da vegetação arbustiva e/ou arbórea ou que foram utilizadas para a prática de silvicultura ou agricultura permanente com uso de espécies nativas ou exóticas.
Regeneração com Pasto	Áreas que, após o corte raso da vegetação natural e o desenvolvimento de alguma atividade agropastoril, encontram-se no início do processo de regeneração da vegetação nativa, apresentando dominância de espécies arbustivas e pioneiras arbóreas. Áreas caracterizadas pela alta diversidade de espécies vegetais.
Agricultura Anual	Áreas extensas com predomínio de culturas de ciclo anual, sobretudo de grãos, com emprego de padrões tecnológicos elevados, tais como uso de sementes certificadas, insumos, defensivos e mecanização, entre outros.
Pasto Limpo	Áreas de pastagem em processo produtivo com predomínio de vegetação herbácea, e cobertura de espécies de gramíneas entre 90 e 100%.
Pasto sujo	Áreas de pastagem em processo produtivo com predomínio da vegetação herbácea e cobertura de espécies de gramíneas entre 50 e 80%, associado à presença de vegetação arbustiva esparsa com cobertura entre 20 e 50%.
Pasto com solo exposto	Áreas que, após o corte raso da floresta e o desenvolvimento de alguma atividade agropastoril, apresentam uma cobertura de pelo menos 50% de solo exposto.
Área Urbana	Manchas urbanas decorrentes da concentração populacional formadora de lugarejos, vilas ou cidades que apresentam infraestrutura diferenciada da área rural apresentando adensamento de arruamentos, casas, prédios e outros equipamentos públicos.
Hidrografia	Águas superficiais.

(continua)

Tabela 2.1: Conclusão.

Classe	Definição TerraClass
Mineração	Áreas de extração mineral com a presença de clareiras e solos expostos, envolvendo desflorestamentos nas proximidades de águas superficiais.
Mosaico de ocupações	Áreas representadas por uma associação de diversas modalidades de uso da terra e que devido à resolução espacial das imagens de satélite não é possível uma discriminação entre seus componentes. Nesta classe, a agricultura familiar é realizada de forma conjugada ao subsistema de pastagens para criação tradicional de gado).
Outros	Áreas que não se enquadram nas chaves de classificação e apresentam padrão de cobertura diferenciada de todas as classes do projeto, tais como afloramentos rochosos, praias fluviais, bancos de areia entre outros.
Área Não observada	Áreas que tiveram sua interpretação impossibilitada pela presença de nuvens ou sombra de nuvens, no momento de passagem para aquisição de imagens de satélite, além das áreas recentemente queimadas.
Reflorestamento*	Áreas que após o corte raso foram reflorestadas com espécies exóticas com a finalidade comercial

*Classe inserida em 2010.

Fonte: Almeida et al. (2016).

2.3 Extração de bacias e redes de drenagem a partir de dados SRTM

Dados de radar possibilitam o mapeamento topográfico por interferometria, que permite extrair informações tridimensionais do terreno. Como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da qual deriva-se o *Digital Elevation Model* (DEM). Rodriguez e Tomasella (2015), por exemplo, utilizaram dados do SRTM para a delimitação da rede de drenagem, distribuição cumulativa de área e índice topográfico através do fluxo de drenagem.

A rede de drenagem é a base para a extração do limite de uma bacia e requer a determinação prévia da direção do fluxo, que é o caminho do escoamento superficial, e da área de contribuição. Para obter um fluxo de drenagem consistente com a hidrologia, é essencial um DEM de boa qualidade (RENNÓ et al., 2008), ou seja, é necessária a correção prévia do mesmo. Esta correção

é de fundamental importância para que sejam removidos os *pits*² que interrompem o fluxo da água. A partir da direção de fluxo é possível definir a área de contribuição, que juntamente com a definição de um limiar de contribuição³ permite extrair a rede de drenagem. Como as redes de drenagem se formam onde há maior acúmulo de água da chuva, quanto menor o valor do limiar, mais ramificada será a drenagem resultante.

Costa et al. (2016) compararam diferentes metodologias: visual; TauDEM; SAGA; e TerraHidro, para extração de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica do Rio Doce-RN. Como dado de entrada utilizaram o DEM do Topodata (VALERIANO, 2008). Os resultados apontaram que o método visual e o TerraHidro possibilitaram a delimitação dos limites em áreas planas, que é uma limitação recorrente para a extração de drenagem e limites de bacia hidrográfica (MORAIS; SALES, 2016; CARDOSO et al., 2015).

2.4 Processamento de imagens para o mapeamento do uso e cobertura da terra

O Sensoriamento Remoto pode ser definido como um conjunto de técnicas que empregam ao mesmo tempo sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados com o objetivo de estudar processos, eventos ou fenômenos que ocorrem com um determinado objeto de interesse. Sensores distintos proveem informações para diferentes usos, de acordo com suas respectivas resoluções espacial, temporal, radiométrica e espectral.

Imagens de sensoriamento remoto são frequentemente utilizadas para mapeamentos temáticos de uso e cobertura da terra. Nesse sentido, podemos destacar os dados do programa Landsat, que possui uma série histórica longa

² Pits são os pontos que não possuem vizinho com elevação menor que a sua e para eles não é possível definir a direção de fluxo (RENNÓ et al., 2008).

³ Esse limiar da área de contribuição representa quantos pixels contribuem para a formação da drenagem (RENNÓ et al., 2008).

com dados a partir de 1972 (USGS, 2017), amplamente utilizados (LINHARES, 2005; RODRIGUEZ, 2010; POMPERMAYER, 2013; OLIVEIRA, 2014). Suas resoluções espacial e temporal permitem não só o mapeamento do uso e cobertura da terra (JENSEN, 2009), mas também acompanhar suas dinâmicas.

Nesta seção iremos abordar algumas técnicas utilizadas para o mapeamento de uso e cobertura da terra nesse trabalho, para o ano de 1984. Como o objetivo deste mapeamento foi completar a base de dados temporal do TerraClasse, a escolha do conjunto de técnicas se baseou nos procedimentos empregados no TerraClass, que foram aplicados ao mapeamento de 1984, dando maior uniformidade aos dados gerados.

2.4.1 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

Para extração de dados de uso e cobertura da terra com imagens de satélite algumas técnicas podem ser aplicadas a fim de auxiliar e facilitar o mapeamento. Uma dessas técnicas é o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (Shimabukuro, 1991; 1997), que permite decompor a imagem original em três componentes: solo, sombra e vegetação e pode ser descrito pela Equação 2.1.

$$r_i = a \cdot \text{vege}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{sombra}_i + e_i \quad (2.1)$$

onde, r_i é a resposta do pixel na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água) do pixel respectivamente; vege_i , solo_i e sombra_i , são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água); e_i é o erro na banda i e i indica a banda do TM.

As frações solo e sombra são utilizadas complementarmente pelo PRODES para auxiliar na extração do desmatamento corte raso (CÂMARA et al., 2013). A fração solo permite a identificação das áreas sem cobertura vegetal e a fração sombra ajuda a identificar áreas que foram desmatadas, mas que

podem ter crescido algum tipo de vegetação em um curto período de tempo (CÂMARA et al., 2013).

O MLME permite realçar os dados de interesse e diminuir o tempo de processamento das imagens, auxiliando a identificar determinadas classes de interesse, como vegetação secundária, solo exposto e corpos d'água.

2.4.2 Algoritmos para classificação de dados de uso e cobertura da terra

Os algoritmos desenvolvidos com técnicas de classificação de imagens são comumente utilizados para mapeamentos temáticos. Os classificadores possuem diferentes abordagens quanto ao classificador, que podem ser agrupados em dois grupos: pixel-a-pixel, que se utilizam da informação espectral para identificar regiões homogêneas; e por regiões, que se utilizam da informação espectral e espacial dos pixels, assemelhando-se ao comportamento do fotointérprete e que necessitam de uma segmentação prévia (CRÓSTA, 1999).

Esses classificadores também podem ser divididos quanto ao método de classificação: supervisionado, que requer um conhecimento prévio sobre os atributos representativos de cada classe de interesse, para poder selecionar regiões de treinamento na imagem; e não supervisionado, que agrupam os pixels segundo suas característica espectrais, com base em parâmetros definidos previamente, mas sem a necessidade do conhecimento prévio por parte do usuário (CRÓSTA, 1999; MENESES; ALMEIDA, 2012; SCHOWENGERDT, 2007; CAMPS-VALL ET AL., 2012). A seguir, serão descritos os algoritmos de classificação por regiões, Iseseg e Bhattacharya, utilizados respectivamente nas metodologias PRODES e TerraClass, e adotados nesse trabalho.

O Iseseg (BINS, 1993), é um classificador não supervisionado, que utiliza como dado de entrada imagens segmentadas por regiões e consiste basicamente, em três etapas. A primeira corresponde à seleção do número de classes e o limiar de aceitação. O limiar de aceitação refere-se à distância de *Mahalanobis*

entre os centros iniciais dos *clusters*, sendo que quanto maior esse limiar, menor o número de classes detectadas (BINS, 1993). A segunda etapa envolve a detecção das classes e o agrupamento segundo parâmetros estatísticos da região. E por fim, na terceira etapa, as regiões são reclassificadas segundo os *clusters* definidos na etapa anterior (BINS, 1993).

O classificador *Bhattacharya* (BHATTACHARYA, 1967) é um classificador supervisionado, ou seja, um algoritmo que requer o treinamento prévio com um conjunto de amostras. Análogo ao Iseseg utiliza-se também imagens segmentadas por regiões baseado na fusão de regiões consideradas homogêneas a partir de um limiar de similaridade. Este classificador mede a separabilidade estatística entre um par de classes espectral, e a distância é medida pela distância mínima (CRÓSTA, 1999) de *Bhattacharya*.

2.5 USLE – Equação Universal de Perda de Solo

A erosão é um fenômeno natural que em um ecossistema em equilíbrio, contribui para os processos de formação do solo. A erosão eólica é o fator mais comum em paisagens planas, com baixa precipitação e com ventos de alta velocidade. A erosão hídrica, por vezes é mais comum em relevos mais acentuados e com maiores índices de precipitação (SILVA et al., 2004; TOMINAGA et al., 2009; PRUSKI et al., 2009), como é o caso das regiões tropicais onde os índices de precipitação são maiores. Guerra et al. (2010) ressaltam que regiões de clima tropical e áreas onde as chuvas são concentradas em determinadas estações do ano, a erosão hídrica pode ser maior do que nas demais regiões, e a conversão florestal pode acelerar esse processo.

Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Medeiros et al. (2016b) citam que a parte do solo geralmente removida pela erosão hídrica são as mais férteis, que contêm húmus e fertilizantes utilizados na agricultura. Ocorre que esse material erodido

por vezes é carregado para os cursos d'água podendo afetar a qualidade física e química da água.

Na microbacia do córrego do Cerveiro, da bacia do Rio Piracicaba, o processo de degradação dos solos por erosão equivale a cerca de quatro vezes o limite superior da tolerância média indicada para a perda de solos, principalmente nas áreas ocupadas por cana de açúcar (WEILL; SPAROVEK, 2008). Na bacia de Suiá-Muçu, no Mato Grosso, estudo realizado por Maeda (2008), mostrou que no período de 1984 a 2005 as áreas desflorestadas atingiram 40% da bacia, causando um aumento médio de 23% na geração de escoamento superficial e o aumento de sedimentos de até $7t.ha^{-1}.ano^{-1}$.

Além do carregamento de nutrientes para os cursos d'água, o material erodido carregado ou assoreado pode ocasionar, muitas vezes, a elevação dos custos de tratamento da água. Em decorrência disso, pode ocorrer a diminuição de eficiência energética nas hidrelétricas, devido à redução da capacidade de acumulação de água nos reservatórios e à alteração do oxigênio dissolvido em razão da turbidez (PRUSKI et al., 2009).

Nesse contexto, alguns modelos são utilizados a fim de estimar a perda de solo, como por exemplo: o *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC), *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Universal Soil Loss Equation* (USLE) e a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). A RUSLE em comparação a USLE mantém os mesmos fatores e formulação alterando apenas a acurácia de cada um deles, entretanto todas as melhorias feitas foram pensadas para os Estado Unidos. Um exemplo é o fator R, que foi corrigido, refinado e consegue capturar o *runoff* das áreas congeladas. Com isso, tem-se um modelo melhorado e desenvolvido para os Estado Unidos que foi implementado em linguagem de programação (software).

A USLE é composta por seis fatores, quatro naturais: precipitação (R); solo (K); topografia (L e S); e dois antrópicos: uso e ocupação do solo (C) e práticas conservacionistas (P). Quando a USLE engloba apenas os parâmetros

naturais, ou seja, quando as perdas de solo ocorrem em uma área mantida continuamente descoberta, exprime o Potencial Natural de Erosão (PNE). A erosividade do solo decorre principalmente de dois fatores naturais que modificam o meio ambiente: o vento e a água (PRUSKI, 2009).

A escolha da utilização da USLE levou em consideração a possibilidade que ela tem de promover melhor adequação às condições específicas da área de estudo. A USLE (WISCHMEIER; SMITH; 1965, 1978), tem sido amplamente utilizada (MEDEIROS, 2016a; OLIVETTI, 2014; PARANHAS FILHO, 2003; ROCHA, 2013; SILVA, 2012) para estimar a perda de solo em relevos complexos e em diversas escalas.

O modelo escolhido para estimar as taxas de perda de solo foi a USLE descrita pela Equação 2.2 de Wischmeier e Smith (1965).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (2.2)$$

Onde, A é a taxa de perda de solo ($\text{Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); R é o fator erosividade da chuva ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); K é o fator erodibilidade do solo ($\text{Mg.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); L é fator comprimento de rampa (adimensional); S é o fator declividade (adimensional); C é o fator uso e manejo (adimensional); e P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), na década de 1980, definiram para o Estado de São Paulo zonas onde o potencial erosivo das chuvas eram uniformes, alertando para a necessidade de se considerar a variabilidade espacial no cálculo da erosividade. Para cada uma destas zonas estes autores determinaram equações baseadas em métodos pluviográficos⁴ (registros pluviográficos de precipitação) (LOMBARDI NETO et al., 1980).

⁴ Pluviográfico é relativo a pluviógrafo. O pluviógrafo capta o volume de chuva de forma contínua, diferente do pluviômetro que não é indicado para medir chuvas de curta duração.

Neste contexto, diversos trabalhos no Brasil têm sido desenvolvidos com base nos padrões regionais da precipitação nos cálculos de erosividade. Mello et al. (2013) propõem um método para o cálculo regionalizado da erosividade utilizando dados pluviométricos (médias mensais e anuais) a partir de duas etapas: a definição de polígonos de abrangência das estações/localidades para as quais foram definidas equações via método pluviográfico (polígonos de Thiessen) e do Índice de Concentração de Precipitação (OLIVER, 1980), que reflete a concentração da precipitação ao longo do ano. Silva (2004) apresenta um compêndio das equações de erosividade de alguns autores baseado em regiões homogêneas de precipitação dividindo o país em oito zonas.

Barbosa et al. (2013) estimaram o potencial erosivo das chuvas nos municípios do entorno da FLONA Tapajós (1972 a 2012) no Pará, utilizando dados pluviométricos das estações de Santarém e Belterra, e aplicando a equação apresentada por Bertoni e Lombardi Neto (1985). Neste estudo constataram que a precipitação em Belterra é maior do que em Santarém e que os valores máximos e mínimos de erosividade estimados foram respectivamente para os anos de 1985 e 1992.

Lima et al. (2014) e Melo e Blanco (2015) realizaram a análise da erosividade para o município de Capitão Poço e para o estado do Pará respectivamente utilizando as regiões homogêneas apresentadas por Silva (2004). Lima et al. (2014), verificaram a aderência do modelo proposta por Wischmeier e Smith, (1965) com o de Silva (2004). Entretanto, Melo e Blanco (2015) ao estimarem a erosividade no estado do Pará, obtiveram valores de 775 a 28028 MJ.mm.ha⁻¹ano⁻¹, sendo os menores valores estimados para a região sudoeste.

O Fator K, referente ao tipo de solo, é outro fator natural da USLE, em que a precipitação através de impacto das gotas no solo pode vir a contribuir com as alterações físicas, químicas e biológicas deste (GUERRA et al, 2010; TOMINAGA et al., 2009). Seus valores são determinados experimentalmente e expressos em taxa de perda de solo (A), por unidade de índice de erosão da chuva (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985) para cada tipo de solo. Os

diferentes tipos de solo em conjunto com os fatores topográficos podem ocasionar um maior incremento derivados da erosão (TOMINAGA et al., 2009).

A declividade (Fator S) corrobora com o aumento da velocidade do escoamento superficial. Simões e Fernandez (2013) compararam diferentes metodologias e resoluções de Modelo Digital de Terreno (MDT) e foi observado que o valor do Fator LS varia de acordo com a metodologia empregada e o MDT utilizado.

Dos fatores associados às ações antrópicas (C e P), o uso e cobertura da terra (fator C) representam a proteção da cobertura vegetal do solo. Assim, quanto menores os valores de C, maior a proteção contra os processos erosivos (PRUSKI, 2009).

Os valores atribuídos para o Fator C são derivados de experimentos, realizados em sua maioria no estado de São Paulo (GALDINO, 2012; AMORIM, 2003; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985). Ou também podem ser derivados de tabelas que levam em consideração o percentual de cobertura vegetal, gramíneas, arbustos, árvores, como apresentado por Lencastre (1992) e Righetto (1980). Trabalhos sobre estimativa de perda de solo para Amazônia, têm utilizado diferentes valores para o Fator C (TAGLIARI, 2009; SILVA, 2012; SANTOS, 2013), por vezes discrepantes, talvez pela falta de experimentos específicos para a região, talvez por conta das diferentes definições para uma classe de mesmo nome.

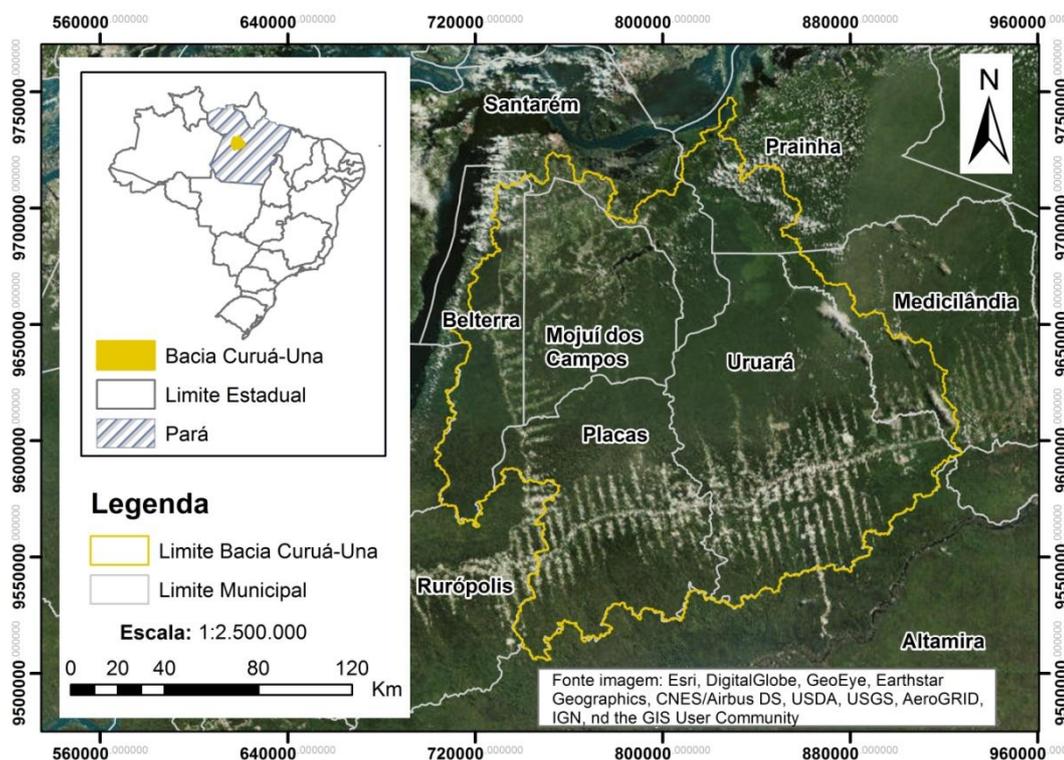
O Fator P, por sua vez, considera as práticas conservacionistas, Lombardi e Neto (1985) e Pruski (2009), por exemplo, ressaltam a relação da perda de solo com o declive das áreas plantadas, o que pode ser minimizado se práticas conservacionistas, que consideram o plantio em curvas de nível, por exemplo, são utilizadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia de drenagem do Rio Curuá-Una, um afluente do rio Amazonas, localizado na região sudoeste do estado do Pará. Com área de aproximadamente 31 mil km² (Figura 3.1), a bacia abrange parte dos municípios de Santarém, Prainha, Medicilândia, Belterra e a totalidade dos municípios de Uruará, Placas e Mojuí dos Campos. Este último município, foi criado em 2013, e sua área foi desmembrada do município de Santarém.

Figura 3.1: Área de estudo.

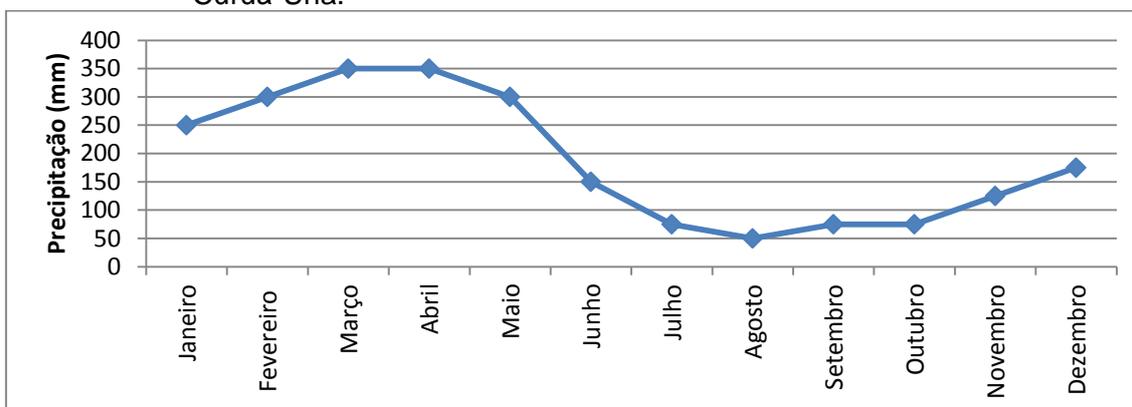


Fonte: Produção da autora.

A região apresenta temperaturas médias superiores a 18° e seu clima é classificado com “Af” pela classificação de “Koppen”, pertencendo a um dos sub-tipos climáticos do clima tropical chuvoso, com precipitação média anual

entre 2000 a 2500 mm e sem estação seca (SEMA, 2016). Os dados médios de precipitação para o período de 1996 a 2006 obtidos por isoietas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), descritos na Figura 3.2, apresentaram médias com máxima de 350 mm e mínima de 50 mm (CPRM, 2011).

Figura 3.2: Média da precipitação mensal para os anos de 1996 a 2006 na bacia do Curuá-Una.



Fonte: Adaptado de CPRM 2011.

O solo predominante na região da bacia é o Latossolo Amarelo e o Argissolo Vermelho e Amarelo. As manchas de Latossolo amarelo na região possuem um nível de fertilidade natural muito baixo, mas por se encontrarem em locais de relevo plano ou suave ondulado são capazes de suportar atividades agrícolas, mediante correções de acidez e aplicação de fertilizantes (VENTURIERI et al, 2010). O Argissolo vermelho amarelo, também apresenta um baixo nível de fertilidade natural, que pode acarretar um coeficiente hidráulico diferenciado e resultar na perda dos poucos nutrientes existentes no horizonte A por erosão hídrica (VENTURIERI et al, 2010). Para seu uso agrícola, é aconselhável manejo que leva em consideração o relevo, textura e a matéria orgânica disponível (VENTURIERI et al, 2010).

De acordo com a classificação morfoestrutural proposta por Furtado; Ponte (2013), na bacia, a unidade de relevo predominante é o Planalto Rebaixado,

com altitudes variando entre 50 a 220 metros, seguido pelo Planalto Tapajós, com altitudes entre 100 a 250 metros, e, em menor proporção, pelo Planalto da Bacia sedimentar do Amazonas.

A bacia do Curuá-Una possui uma hidrelétrica, que foi inaugurada em 1977, para o abastecimento de Santarém e da região de Aveiro, com capacidade inicial de 20 MW, duas turbinas e uma área alagada inferior a 100 km² (SARÉ, 2003; Junk e Mello, 1990). Atualmente, ela opera com capacidade 30,3 MW e 3 turbinas (ELETROBRAS, 2017). Até os anos de 1980, a usina era um das duas únicas operantes na bacia Amazônica (Junk e Mello, 1990).

Desde a implantação da hidrelétrica do Curuá-Una, tem-se registro de povoamento ao longo da bacia (MPEG, 1985). Na margem esquerda da represa, por volta de 1985, estava concentrada a maioria do povoamento com predomínio de atividades relacionadas com a agricultura familiar (MPEG, 1985; SOUZA, 2016) e grandes extensões de terras sem uso na parte sul do rio (MPEG, 1985).

Registros de 2003 estimam a população do entorno da represa em 1.900 pessoas, com atividade de extrativismo e agricultura (OLIVEIRA et al., 2003). Oliveira et al. (2003) relatam as pressões dos produtores de soja para compra de terra dos agricultores por preços abaixo do mercado. Estudo de D'Antona et al. (2015) para 2010 foi observada a concentração da população nas rodovias BR-230 e BR-163, assim como em áreas urbanas ao longo das principais rodovias e dos Rios Tapajós e Amazonas.

3.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho compreendem dados de sensoriamento remoto, dados de uso e cobertura da terra, dados cartográficos e ambientais. Esses dados são listados e descritos na Tabela 4.1 e 4.2. Todas as imagens TM apresentadas na Tabela 4.2 são do Landsat 5. Para este trabalho apenas

as imagens dos anos de 1984/85 são em números digitais, as demais imagens utilizadas estão em reflectância de superfície.

Tabela 4.1: Dados a serem utilizados.

Descrição	Ano	Fonte	Resolução Espacial
Altimetria	2000	USGS	30m
Altimetria	2004	CGIAR	90m
Declividade	2008	INPE	30m
Precipitação - Média Mensal	1950 à 2000	WorldClim - Global Climate Data	~1km
Uso e Cobertura da Terra - TerraClass	1990*	INPE/EMBRAPA	30m
Uso e Cobertura da Terra - TerraClass	2000*	INPE/EMBRAPA	30m
Uso e Cobertura da Terra - TerraClass	2008	INPE/EMBRAPA	30m
Uso e Cobertura da Terra - TerraClass	2014	INPE/EMBRAPA	30m
Desmatamento - PRODES	2000	INPE	60m
Rodovias	2015	DNIT	-
Unidade de Conservação	2016	ICMBio	-
Terra Indígena	2016	FUNAI	-
Limite Político Administrativo Municipal	2013	IBGE	-
Limite Político Administrativo Estadual	2010	IBGE	-
Mapa de Solos	2010	Embrapa Amazônia Oriental	-
Mapa de Solos	2009	Embrapa	-
Setor Censitário	2000	IBGE	-

*Dado ainda não publicado oficialmente.

Fonte: Produção da autora.

Tabela 4.2: Relação das Imagens Landsat

	Orbita/Ponto	Data	Sensor
1984	226/062	16/07/1984	TM
	226/063	03/07/1985	TM
	227/062	24/08/1984	TM
	227/063	24/08/1984	TM
1990	226/062	19/09/1990	TM
	226/063	19/09/1990	TM
	227/062	09/08/1990	TM
	227/063	09/08/1990	TM
2000	226/062	28/07/2000	TM
	226/063	28/07/2000	TM
	227/062	02/08/1999	TM
	227/063	20/08/2000	TM
2008	226/062	02/07/2008	TM
	226/063	02/07/2008	TM
	227/062	02/07/2008	TM
	227/063	23/06/2008	TM
2014	226/062	20/08/2014	OLI
	226/063	30/10/2014	OLI
	227/062	20/08/2014	OLI
	227/063	10/07/2014	OLI

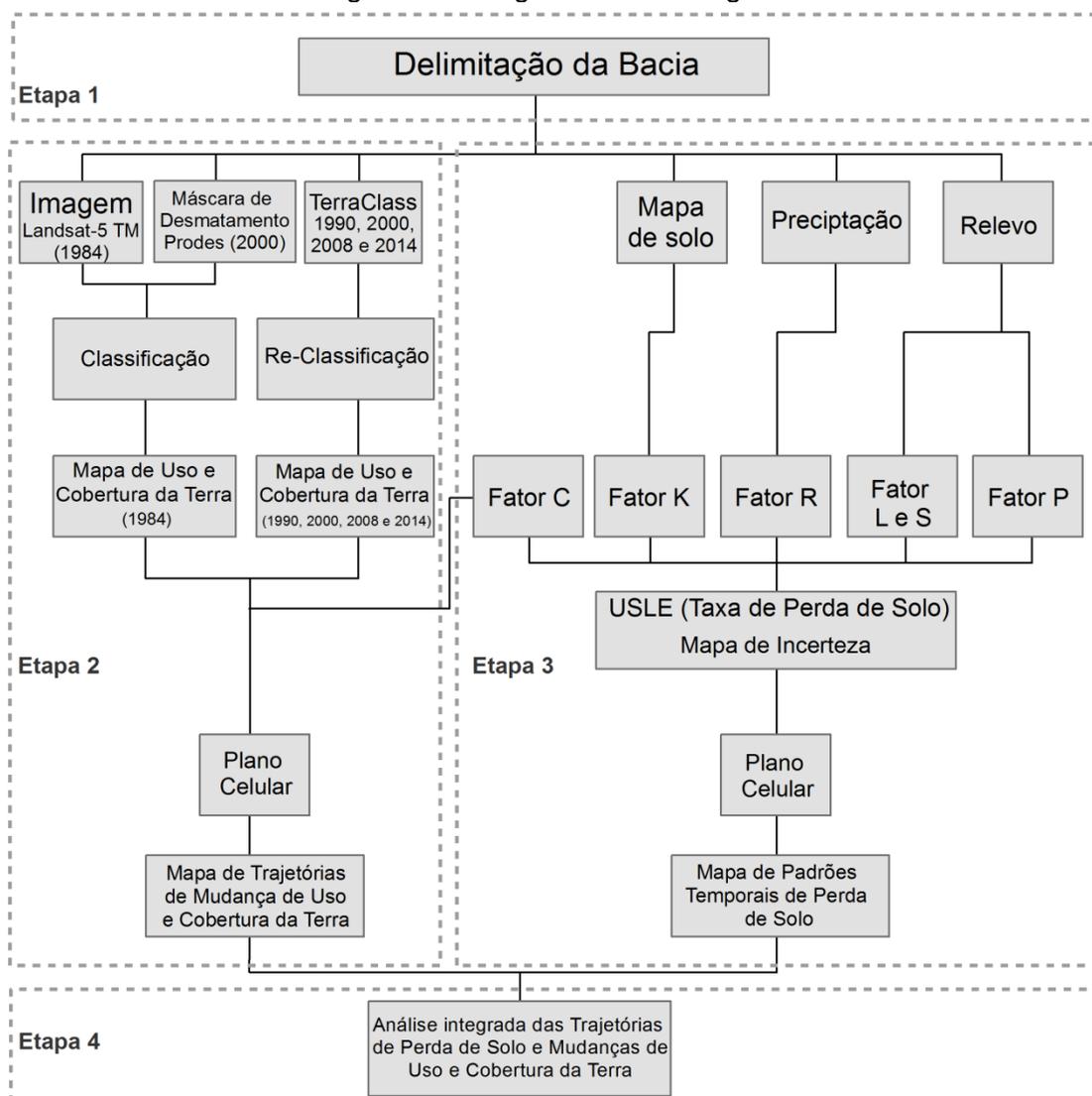
Fonte: Produção da Autora

3.3 Procedimentos metodológicos

A metodologia deste trabalho foi organizada em quatro etapas principais. Na Etapa 1, foi realizada a delimitação da bacia do Curuá-Una e a extração da drenagem a partir de limiares empíricos, utilizando o aplicativo TerraHidro e os dados de altimetria de 30m e 90 m de resolução espacial. A etapa 2 consistiu no mapeamento de uso e cobertura da terra da bacia do Curuá-Una com imagens Landsat, tendo como referência as classes e técnicas de processamento de imagens utilizadas no TerraClass e no PRODES. Além da produção do mapa de uso e cobertura da terra para o ano de 1984, foram utilizados dados do TerraClass para os anos de 1990, 2000, 2008 e 2014, que passaram por uma fase de reclassificação, para atender aos objetivos desse trabalho. Como

principal resultado da etapa 2 foi gerada a trajetória de uso e cobertura da terra a partir dos mapas de 1984, 1990, 2000, 2008 e 2014. Na terceira etapa foi utilizada a equação USLE para a estimativa da perda de solo, na qual os fatores que compõem esse modelo foram estimados e representados por grades regulares. Todos os procedimentos dessa etapa foram realizados utilizando-se de linguagem de programação em *python*. Como existem discrepâncias entre mapas e valores de referência na literatura, principalmente aqueles relativos à erodibilidade (Fator K) e à cobertura da terra (Fator C), foram geradas quatro grades para o fator K e duas para o Fator C, obtendo-se, assim, oito mapas resultantes da equação USLE. Para as estimativas de perda de solo, foi utilizado um mapa derivado da mediana das oito grades de perda de solo. A combinação dos oito mapas possibilitou gerar também um mapa de incertezas, indicando as áreas que apresentaram maiores e menores variações nas estimativas de perda de solo. Por último, na etapa 4, foi realizada uma análise combinada dos mapas de trajetória de uso e cobertura da terra e dos padrões temporais de perda de solo, confrontando os mesmos com as áreas onde possuem cursos d'água e áreas agrícolas. As quatro etapas são apresentadas no diagrama metodológico (Figura 4.1) e descritas detalhadamente nas seções 4.2.1, 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.4 respectivamente.

Figura 4.1: Diagrama metodológico.



Fonte: Produção da autora.

3.3.1 Delimitação da bacia

A delimitação da bacia foi realizada em três etapas: 1) Obtenção do mosaico dos Modelos Digital de Elevação (MDE); 2) Extração de drenagem; e 3) Delimitação da bacia. A extração da drenagem e a delimitação da bacia foram realizadas de forma automática através do software TerraHidro versão 5.0 (Extração de drenagem) e versão 4.2 (Delimitação da bacia).

Para a geração do mosaico dos MDEs, foram utilizadas seis cenas do MDE de resolução espacial de 30 m e duas cenas para o MDE de resolução de 90 m. Os MDEs de 90 m foram utilizados na Etapa 2 para determinar os valores dos *voids*⁵ dos MDEs de 30 m. Após a articulação dos mosaico dos MDEs, procedeu-se a operação de extração da rede de drenagem.

Na etapa de extração da drenagem, inicialmente foi executada a correção do MDE de 30m. A fim de deixá-lo hidrológicamente mais consistente foram realizadas duas etapas: a primeira para remoção dos *voids*, e uma segunda para a remoção dos mínimos locais, áreas planas e fossos (ROSIM et al., 2013). Para a remoção dos *voids*, foi realizada uma interpolação bilinear, na qual o mosaico do MDE de 90 m foi interpolado para as áreas de *void* do MDE de 30 m. Na sequência, foi efetuada a remoção dos mínimos locais, áreas planas e fossos.

Após as correções aplicadas no MDE de 30 m, foi extraída a direção de fluxo. Para os casos de empate entre valores dos pixels (vizinhos), o algoritmo adota como desempate a média móvel e atribui o valor estimado da média móvel ao pixel em questão. A partir da direção do fluxo, é calculada a área de contribuição, e, por meio de um limiar empírico a rede de drenagem é extraída. Por fim, com a rede de drenagem extraída e a criação de um ponto de exutório obteve-se a delimitação da bacia do Rio Curuá-Una.

3.3.2 Mapeamento do uso e cobertura da terra

Foram utilizadas quatro imagens Landsat-5 TM (Tabela 4.2) para a classificação do uso e cobertura da terra da área de estudo em 1984, sendo necessário utilizar a cena 226/063 do ano de 1985, devido à alta cobertura de nuvens presente nessa cena em 1984. As imagens selecionadas buscaram

⁵ Os *voids* no SRTM são pixel cujo valor é de -32767/-32768, portanto, representam pixels sem informação.

atender aos critérios adotados na metodologia do PRODES: seleção de imagens orbitais do período entre julho a setembro e com menor taxa de cobertura de nuvem (CÂMARA et. al, 2013).

O procedimento adotado baseou-se nos procedimentos estabelecidos no Projeto TerraClass (Almeida et al., 2016), sendo dividido em duas etapas. Na primeira etapa foi extraída a máscara de desmatamento, seguindo os procedimentos adotados no PRODES (CÂMARA et al., 2013). Posteriormente, foi aplicado o protocolo do TerraClass para a classificação de uso e cobertura das áreas desmatadas. Esses procedimentos adotados para o mapeamento do uso e cobertura da terra são descritos nas seções 4.2.2.1, 4.2.2.2, 4.2.2.3, 4.2.2.4. Por fim a seção 4.2.2.5 apresenta a trajetória do uso e cobertura da terra dos anos estudado: 1984, 1991, 2000, 2008 e 2014.

3.3.2.1 Pré-processamento das imagens

As imagens do ano de 1984, apesar de estarem disponíveis com correção geométrica (georreferenciamento), foram corrigidas com base nas imagens de satélite (Landsat) utilizadas no PRODES do ano de 2000. Esse procedimento é necessário, pois os dados matriciais utilizados das classes Não-Floresta, Hidrografia e Floresta, derivados do PRODES, foram utilizados como uma máscara para os outros anos. O georreferenciamento foi realizado por meio de co-registro com a seleção de pontos de controle.

3.3.2.2 Máscara do desflorestamento

Após a correção geométrica, foi aplicada a máscara de desmatamento nas imagens de 1984, composta pelas seguintes classes do PRODES 2000: Floresta, Não-floresta e Hidrografia. A utilização da máscara possibilitou realizar o mapeamento apenas nas áreas que até 2000 foram classificadas como Desmatamento. O objetivo de usar a máscara foi diminuir a área de mapeamento, removendo as áreas que permaneceram como floresta entre 1984 e

2000, restringindo o mapeamento apenas para as áreas classificadas como desmatadas em 2000.

Para o mapeamento das áreas desmatadas foi aplicado o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (Shimabukuro, 1991), gerando-se 3 imagens fração: sombra, solo e vegetação. Para extração das sombras de nuvens foi utilizada a fração sombra. Limiares para separação dessa classe das demais foram definidos de forma empírica para cada uma das quatro imagens. Na sequência, foram extraídas as nuvens, por meio de um algoritmo de segmentação por crescimento de regiões aplicado na fração sombra. Em seguida, foi realizada uma classificação não supervisionada, com o algoritmo ISOSEG (BINS et al., 1993), usando-se limiares de aceitação de 95%, similaridade 8 e área de 16 pixels. As áreas de nuvem e de sombra de nuvens mapeadas foram, então, adicionadas à máscara. Por fim, foi realizada a extração da classe floresta com a imagem fração vegetação, também a partir de limiares obtidos empiricamente em cada imagem. As áreas mapeadas a partir desses procedimentos foram classificadas como Floresta e Área Não-Observada e foram incorporadas na máscara. As áreas restantes foram classificadas como Desmatamento, e na etapa posterior, cujos procedimentos são apresentados na seção 4.2.2.3, foram classificadas para outras classes de uso e cobertura da terra.

O mapeamento obtido nessa etapa passou por interpretação visual e edição manual a fim de corrigir possíveis erros de classificação. O resultado final obtido foi um mapa com as classes de Desmatamento, Floresta, Não Floresta, Hidrografia e Área Não-Observada para o ano de 1984.

3.3.2.3 Classificação do uso e cobertura da terra

Nesta etapa as áreas desmatadas relativas ao ano de 1985, cujos procedimentos foram descritos na seção 4.2.2.2, foram classificadas utilizando-se as imagens fração, seguindo a metodologia adaptada de Almeida et al. (2016).

As classes mapeadas neste trabalho basearam-se nas categorias definidas no TerraClass, que foram reagrupadas para as seguintes categorias: Área Urbana; Vegetação Secundária; Pasto Limpo; Pasto Sujo e Outros. Ressalta-se que para o ano de 1984, a classe Agricultura Anual não foi mapeada, tendo em vista que nesse período, não se encontra na área de estudo o padrão definido por Almeida et al., 2016. De acordo com os dados de produção agrícola da CONAB (2017), a soja foi inserida no estado do Pará apenas nos anos de 1997/98. Com relação a Santarém, o início do plantio se deu a partir de um projeto piloto desenvolvido no ano de 1997 (AGRÁRIA; QUINCÓ , 1997). Todavia, a Agricultura Anual, fez parte do mapeamento do TerraClass nos anos subsequentes, em 2000, 2008 e 2014, cujos dados foram utilizados nesse trabalho.

A classificação do uso e cobertura da terra para o ano de 1984 foi realizada de forma sequencial, como no TerraClass, em que as classes são mapeadas individualmente, seguindo etapas . Neste procedimento, uma vez que tenha sido atribuída uma classe a uma área, essa área é excluída das próximas fases do mapeamento, sendo automaticamente incorporada à máscara, dando, então, sequência ao mapeamento da classe seguinte. Dessa forma, os procedimentos para o mapeamento das classes baseou-se em Almeida et al (2016) e são descritos abaixo, seguindo a seguinte ordem:

- a) Área Urbana: o mapeamento dessa classe foi realizado por meio de interpretação visual, das bandas 3, 4 e 5 na composição RGB do sensor Landsat-5 TM. Para auxiliar na identificação dessa classe, foi utilizado como dado de apoio, as áreas urbanas mapeadas no TerraClass do ano de 2008.
- b) Vegetação secundária: a obtenção dessa classe se deu por meio do uso da imagem fração vegetação resultante da aplicação do MLME. O mapeamento foi realizado a partir do uso de uma operação de fatiamento, cujo limiar utilizado para indicar a presença dessa feição no pixel, foi definido de forma empírica nas imagens.

- c) Pato sujo e Pasto limpo: o mapeamento dessas classes foi realizado em duas etapas, uma que compreendeu o uso de um algoritmo de segmentação por crescimento de regiões, com o índice de similaridade variando de acordo com a imagem, entre 10 e 20 e a área mínima de 49 pixels (4,41 ha), conforme estabelecido por Almeida et al., 2016. Após a segmentação foi utilizado o classificador Bhattacharya. As classes extraídas dessa classificação foram diferenciadas em Pasto Sujo e Pasto Limpo.

Após a finalização do mapeamento, foi realizada uma auditoria no mapa resultante, confrontando-se a imagem com a classificação, para o ajuste de possíveis erros. Na última etapa, foi realizada a junção do mapeamento executado nessa seção com as classes Floresta, Não-Floresta, Hidrografia, Área não observada, obtidas na etapa anterior, obtendo-se assim, o mapa final de uso e cobertura da terra para o ano de 1984.

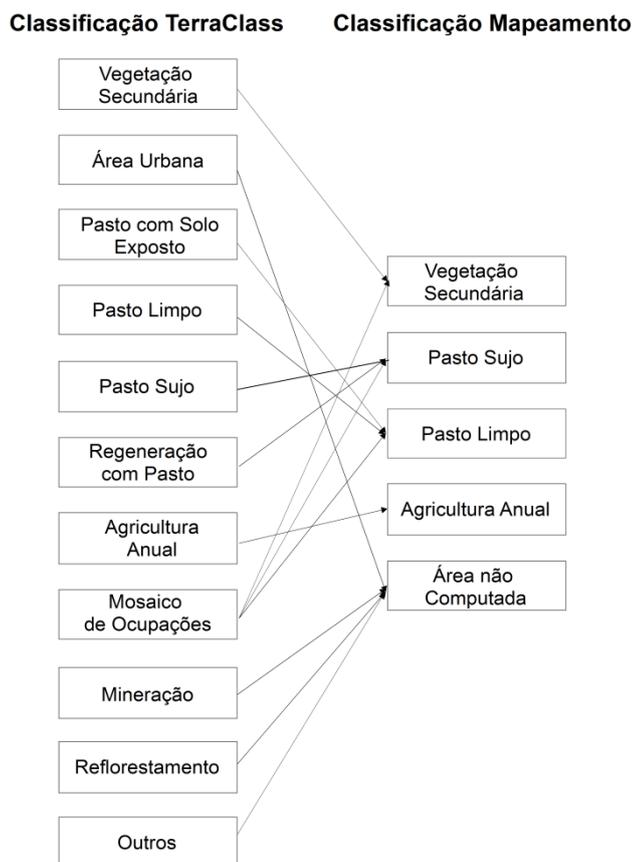
Para a avaliação do resultado desta etapa de classificação, foram extraídos 120 pontos a partir de uma amostragem aleatória estratificada, por classe (Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo, Área não Observada). Posteriormente esses pontos foram classificados por um fotointérprete independente para a realização de avaliação de concordância do mapa gerado.

3.3.2.4 Reclassificação do TerraClass

Os dados do TerraClass 1991, 2000, 2008 e 2014 tiveram algumas classes mantidas e outras foram agrupadas. As classes de uso e cobertura da terra utilizadas nesse trabalho foram: Agricultura Anual, Pasto Sujo, Pasto Limpo, Vegetação Secundária, Reflorestamento, Área não observada, Área urbana e Outros . As classes Mineração, Pasto com Solo Exposto e Regeneração com Pasto, foram reclassificadas conforme Figura 4.2. A classe Mosaico de Ocupações, que é uma classe mista, foi refinada por meio de procedimentos automáticos, e decomposta nas classes Vegetação Secundária; Pasto Sujo; e

Pasto Limpo. Souza (2016) fez o refinamento desta classe utilizando imagens do RapidEye para o ano de 2012, que apresenta resolução espacial de 5 m, e identificou, além dessas três classes, a classe Área Urbana. Contudo, neste trabalho, devido ao uso das imagens Landsat, com resolução espacial de 30 m, a classe Área Urbana não foi identificada e, portanto, não foi mapeada.

Figura 4.2: Correspondência entre os dados do TerraClass e as categorias utilizadas na pesquisa, obtidas com o refinamento e/ou agrupamento de classes do TerraClass



Fonte: Produção da Autora.

Para a reclassificação dos polígonos de Mosaico de Ocupação foram utilizadas as imagens de reflectância de superfície nível 2 (Tabela 4.2), para as imagens TM e OLI. Foram utilizadas as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM e as bandas 4, 5 e 6 do sensor OLI. Primeiramente, dentro dos limites dos polígonos de Mosaico de Ocupação foram extraídos os atributos de: valor máximo; valor mínimo;

média; soma dos valores; variância; desvio padrão; amplitude; mediana; coeficiente de variação; e moda. Em seguida, foram selecionadas amostras das classes Vegetação Secundária, Pasto Sujo e Pasto Limpo para todos os anos. Essas amostras serviram como referência na classificação e foram 54 para o ano de 1990, 56 para o ano de 2000, 49 para o ano de 2008 e 40 para o ano de 2014.

A técnica empregada para a discriminação dessas classes foi, mineração de dados baseada em um algoritmo por árvore de decisão, no qual parte das amostras são utilizadas para o treinamento do classificador, que identifica os atributos que melhor discriminam as classes (QUINLAN, 1986). E parte das amostras é utilizada como amostras de teste da árvore de decisão. Para tal procedimento optou-se pelo algoritmo C5.0 utilizando o procedimento do *Boosting* que gera n árvores de decisão, sendo o valor de n definido pelo usuário, que pode utilizar os resultados obtidos de forma combinada, a fim de melhorar o resultado final da classificação, diminuindo assim, possíveis erros de classificação (QUINLAN, 2018).

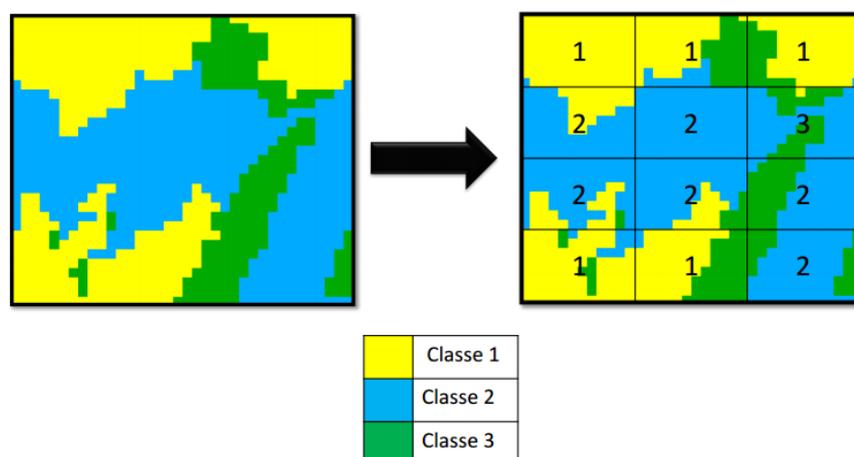
Foram rodadas dez vezes o *Boosting* a fim de escolher o que obtivesse o maior valor Kappa das amostras de teste, com o n igual a 100. Do total das amostras, 70% das 199 foram utilizadas para treinar o classificador e 30% para teste. A partir delas foi possível elaborar uma matriz de confusão a fim de avaliar o resultado da classificação.

3.3.2.5 Trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra

A trajetória de mudança de uso e cobertura da terra tem como objetivo identificar as áreas cujas mudanças de uso e cobertura da terra contribuíram, positiva ou negativamente, para os processos erosivos durante o período de 1984 a 2014. Inicialmente, os mapas de uso e cobertura da terra apresentados nas seções anteriores foram agregados em um plano celular de 1x1 km. Para incorporação dos dados de uso e cobertura da terra foi utilizada a operação de

“maioria”, na qual cada célula foi classificada conforme a classe predominante em termos de área na célula (Figura 4.3).

Figura 4.3: Exemplo de aplicação da operação de classe majoritária.



Fonte: Gavlak e Escada (2010).

Após a incorporação de todos os mapas de uso e cobertura da terra foi realizado um teste de consistência dos dados no qual se verificou as transições inconsistentes de classes, como aquelas relativas às células que apresentavam classes diferentes de Floresta ou Área não Observada em um ano, e floresta no ano posterior⁶. Também se verificou as células que foram classificadas como classe majoritária Área não observada. Essas células foram reclassificadas, quando possível, com base no seu uso do ano anterior e posterior.

A partir dos mapas incorporados no plano celular e após a verificação da consistência, foram definidas as trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra e a sua contribuição para a perda de solo. As classes utilizadas para a definição das trajetórias são apresentadas na Tabela 4.3, ordenadas em ordem

⁶ Uma área desmatada, pela definição utilizada pelo PRODES não pode retornar a floresta primária, ela pode ser convertida para Vegetação Secundária ou outras classes, mas nunca mais será floresta primária.

crescente quanto à sua contribuição para os processos erosivos. Nessa hierarquização, considera-se que a classe Floresta representa a classe de menor impacto (-), enquanto a Agricultura Anual a de maior (+) impacto, da mesma forma como foi feita a ponderação para os valores do Fator C.

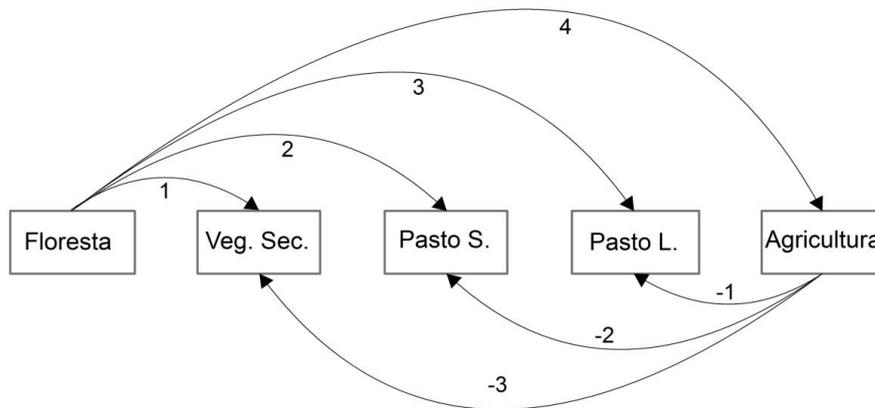
Tabela 4.3: Ordenamento das classes quanto à contribuição para os processos de perda de solo.

Impacto nos processos erosivos	Classe	
	-	Floresta
		Vegetação Secundária
		Pasto Sujo
		Pasto Limpo
	+	Agricultura Anual

Fonte: Produção da Autora.

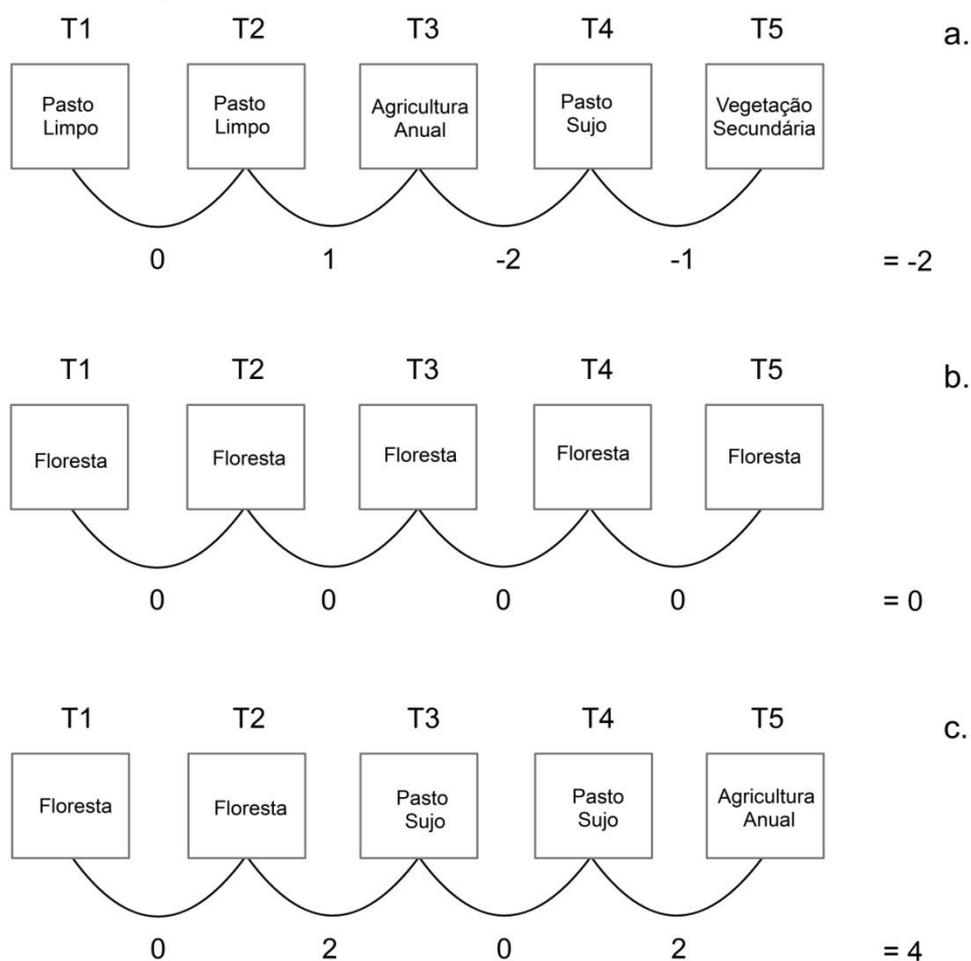
Para a construção da trajetória, primeiramente foi realizada uma análise por intervalos de tempos (T), 1984 (T1), 1990 (T2), 2000 (T3), 2008 (T4) e 2014 (T5) – cujo resultado é o valor correspondente à mudança da classe de um ano para o outro (Figura 4.4). Para identificar o valor correspondente verifica-se o ordenamento da classe na Tabela 4.3. Por exemplo, se em T1, a classe era Floresta e em T2 permaneceu como Floresta, sua mudança recebe valor igual a 0 (zero). Mas se em T3 a classe era Pasto Sujo, sua mudança recebe o valor 2 (dois) (Figura 4.5 - c). A Figura 4.5 ilustra alguns exemplos de possíveis mudanças no uso e cobertura da terra nos cinco períodos de tempo analisados.

Figura 4.4: Exemplo de valor correspondente à mudança.



Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.5: Exemplo de trajetória de mudança de uso e cobertura da terra para os tempos: T1, T2, T3, T4 e T5.



Fonte: Produção da autora.

Com a soma das mudanças nos anos analisados obteve-se uma tipologia de trajetória de mudanças de uso e cobertura da terra orientada para sua contribuição para a perda de solo. A trajetória é baseada em um índice que varia de -2 a 4 (Tabela 4.4). Números negativos marcam trajetórias onde, no geral, ocorreu aumento da cobertura vegetal no sentido de menor impacto (contribuição) para perda de solo. Na tipologia, o zero simboliza áreas onde as classes foram constantes, não importando se a mesma é Floresta ou Pasto Limpo, ou seja, durante o período analisado a condição de perda de solo se

manteve a mesma. Números positivos descrevem trajetórias nas quais, as mudanças da cobertura da terra em gradações diferentes contribuíram para o processo de perda de solo. A trajetória foi analisada célula a célula. Células cujas classes majoritárias foram Área Urbana, Hidrografia, Não Floresta ou Outros, foram desconsideradas para o cômputo das trajetórias.

Tabela 4.4: Índice da trajetória de mudança de uso e cobertura da terra no período de 1984 à 2014.

Representação	Índice	Descrição
	-2	Descreve uma célula cuja trajetória inicia-se na classe Pasto Limpo e finaliza na classe Vegetação Secundária.
	-1	Descreve uma célula que ao longo da trajetória obteve aumento de área da cobertura vegetal.
	0	Descreve uma célula que manteve ao longo da trajetória o mesmo tipo de cobertura.
	1	Descreve uma célula com baixa remoção da cobertura vegetal ao longo da trajetória, dada sua classe inicial. Ou de predominância de cobertura vegetal ao longo da trajetória.
	2	Descreve uma célula com média remoção da cobertura vegetal ao longo da trajetória, dada sua classe inicial. Ou de média predominância de cobertura vegetal ao longo da trajetória.
	3	Descreve uma célula com intermediária remoção da cobertura vegetal ao longo da trajetória, dada sua classe inicial. Ou de baixa predominância de cobertura vegetal ao longo da trajetória.
	4	Descreve uma célula cuja trajetória inicia-se na classe Floresta e finaliza na classe Agricultura Anual.

Fonte: Produção da autora.

3.3.3 Estimativa de perda de solo (USLE)

As taxas de perda de solo foram estimadas para os anos de 1984, 1990, 2000, 2008 e 2014 por meio do uso da equação USLE e da estimativa dos fatores que compõe esse modelo. Os seis fatores que integram este modelo são

descritos nas seções 4.2.3.1, 4.2.3.2, 4.2.3.3 e 4.2.3.4, bem como a forma na qual foram estimados, espacializados e representados. Após o cálculo de cada fator foi realizada a estimativa da perda de solo que é apresentada na seção 4.2.3.5. A seção 4.2.3.6 apresenta a incerteza gerada a partir dos mapas de estimativa de perda de solo. Na seção 4.2.3.7 foi gerado um mapa síntese com os padrões temporais de perda de solo para os anos de 1984, 1990, 2000, 2008 e 2014.

3.3.3.1 Fator R

O fator R representa a erosividade da chuva, é um índice de erosão para uma localização específica e mede a força erosiva da precipitação específica pela energia cinética e pela intensidade máxima da precipitação em 30 minutos (WISCHMEIER; SMITH, 1978; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1985); PRUSKI, 2009). Diferentes metodologias podem ser aplicadas para calcular o fator R (WISCHMEIER; SMITH, 1965, 1978; RENARD; FREIMUND, 1994; MELLO ET AL., 2013; SILVA, 2004). Neste trabalho seguimos o método de Silva (2004), em que é possível identificar a qual divisão regional em termos de precipitação pertence a área da bacia.

Para estimar o fator erosividade (R), foram utilizados os dados de precipitação mensal do WorldClim - Global Climate Data (HIJMANSet al., 2005) (<http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/download.php>). O dado do WorldClim é originado de uma interpolação de diferentes fontes de dados climatológicos do período de 1950 a 2000 e com resolução espacial de 30' o equivalente a aproximadamente 1 km.

A erosividade foi calculada através da Equação (4.1) proposta por Morais et al. (1991) citado por Pruski (2009) e ao final a erosividade foi reamostrada para 30m. Esta equação foi extraída com base na divisão do Brasil em termos das características de precipitação de Silva (2004) (Figura 4.6), ou seja, essa equação é ajustada às variações climáticas regionais, o que para o Brasil é

especialmente relevante, considerando a heterogeneidade climática do território. Embora mais robusto, o método de Mello et al. (2013) não foi utilizado porque são escassas as equações de erosividade adaptadas para a região.

$$R_x = 36,849 * \left(\frac{M_x^2}{P}\right)^{1,0852} \quad (4.1)$$

onde, R_x é a erosividade da chuva para cada mês; M_x é a precipitação média mensal; e P a precipitação média anual.

Figura 4.6: Divisão do Brasil em regiões homogêneas, em termos de características da precipitação.



Fonte: Silva (2004).

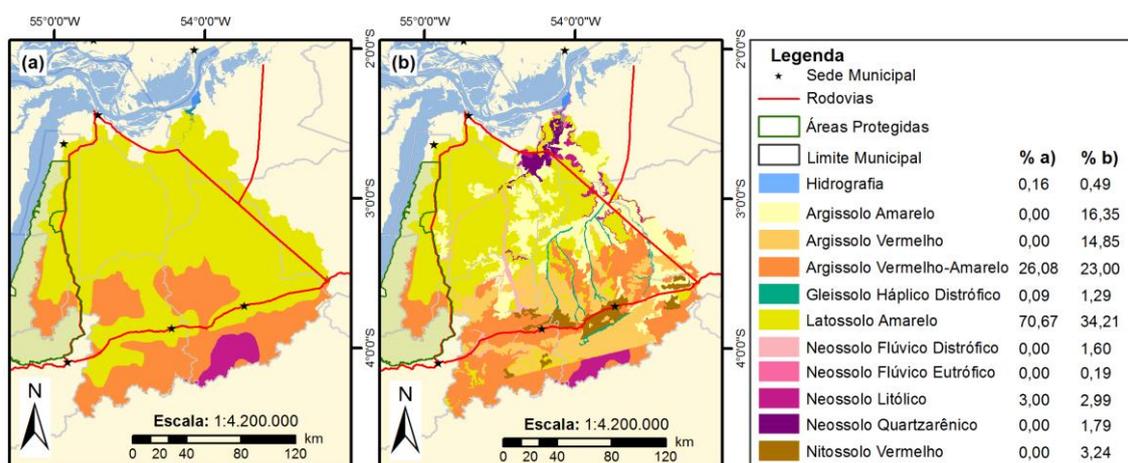
3.3.3.2 Fator K

O fator K representa a forma como o solo é suscetível à erosão do solo. Os valores de K são definidos por experimentos para cada tipo de solo, através de parcelas com declividade do terreno e o comprimento de rampa padrão e um solo descoberto. Ao longo das medições do experimento é calculado o volume

de solo erodido na parcela e no final o valor de K é calculado pela razão do solo erodido pela precipitação (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Os mapas de solos utilizados para identificação dos tipos de solo na região e para a espacialização da erodibilidade, foram os mapas de solos do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) produzido pela Embrapa Amazônia Oriental (2010) na escala de 1: 250.000 e o mapa de solos do IBGE e Embrapa (2001) na escala de 1: 5.000.000. O dado mais adequado para a estimativa do Fator K, seria o mapa da Embrapa Amazônia Oriental, devido ao detalhamento das informações presentes, entretanto, este mapa não abrange toda a área de estudo. Devido a essas limitações e pelo fato de que um mapa não é a generalização do outro possuindo formas e tipo de solos diferentes optou-se por estimar o fator K de duas maneiras. A primeira baseou-se no uso do mapa de solos do IBGE e Embrapa (2001), menos detalhado, enquanto a segunda baseou-se na composição de um mapa que integrou as duas bases de dados, em que o mapa menos detalhado (IBGE; EMBRAPA, 2001) foi utilizado para complementar a base de dados da Embrapa Amazônia Oriental (2010), com as informações nas áreas não mapeadas (Figura 4.7).

Figura 4.7: Mapa de Solos



a) Mapa de Solos 1: 5.000.000; b) Mapa de Solos na escala de 1: 250.000 e o mapa do IBGE e Embrapa (2001) na escala de 1: 5.000.000.

Fonte: Produção da Autora.

Para a estimativa do fator K, foram consultados os valores de erodibilidade (K) comumente utilizados na literatura para os diversos tipos de solo encontrados na área de estudo, entretanto, devido à escassez de experimentos para a região Amazônica, optou-se por utilizar duas tabelas distintas. A primeira tabela utilizada baseia-se principalmente em Ranzani (1980), que utilizou os dados do Projeto Radam Brasil para o cálculo da erodibilidade (Tabela 4.5). A segunda Tabela é composta majoritariamente por valores extraídos de Silva et al. (2011) que realizaram um estudo do potencial natural de erosão para todo o território brasileiro (Tabela 4.6). Assim, a estimativa do fator K foi realizada para cada um dos mapas, produzindo quatro resultados distintos.

Tabela 4.5: Fator K baseado em referências do RADAM e da Amazônia.

Tipo de Solo	Fator K	Referência
Argissolo Amarelo	0,052100	Nunes et al. (2017)
Argissolo Vermelho	0,052100	Nunes et al. (2017)
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,198854	Adaptado de Ranzani (1980)
Gleissolo Háplico Distrófico	0,313333	Adaptado de Ranzani (1980)
Latossolo Amarelo	0,078750	Adaptado de Ranzani (1980)
Neossolo Flúvico Distrófico	0,223330	Adaptado de Ranzani (1980)
Neossolo Flúvico Eutrófico	0,223330	Adaptado de Ranzani (1980)
Neossolo Litólico	0,223330	Adaptado de Ranzani (1980)
Neossolo Quatzarênico	0,223330	Adaptado de Ranzani (1980)
Nitossolo Vermelho	0,023700	Silva e Álvares (2011)

Fonte: Produção da Autora

Tabela 4.6: Fator K baseado em referências utilizadas para o Brasil e para o estado de São Paulo.

Tipo de Solo	Fator K	Referência
Argissolo Amarelo	0,0374	Silva et al. (2011)
Argissolo Vermelho	0,0374	Silva et al. (2011)
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,0283	Adaptado de Manniguel et al. (2002)
Gleissolo Háptico Distrófico	0,0344	Silva et al. (2011)
Latossolo Amarelo	0,0246	Silva et al. (2011)
Neossolo Flúvico Distrófico	0,0450	Silva et al. (2011)
Neossolo Flúvico Eutrófico	0,0450	Silva et al. (2011)
Neossolo Litólico	0,0351	Silva et al. (2011)
Neossolo Quatzarênico	0,0534	Silva et al. (2011)
Nitossolo Vermelho	0,0132	Silva et al. (2011)

Fonte: Produção da Autora

Como resultado dos procedimentos desenvolvidos nessa etapa, são gerados quatro mapas de erodibilidade a partir da combinação dos dois mapas de solos e das duas tabelas com os valores de referência estabelecidos para cada tipo de solo.

3.3.3.3 Fatores L e S

O fator topográfico é composto pelo comprimento de rampa (L) e inclinação do terreno (S). Este fator corresponde ao escoamento superficial e à quantidade de sedimentos que são lixiviados (Wischmeier & Smith, 1978; Moore et al., 1991; Desmet & Govers, 1996).

Os fatores L e S, que dizem respeito ao comprimento de rampa e à declividade do terreno, respectivamente, foram obtidos a partir do dado do TOPODATA (VALERIANO, 2008). Para o cálculo de L, foi utilizado o modelo de Desmet e Govers (1996) (Equação 4.2). Optou-se por esse modelo uma vez que o mesmo considera o conceito de área acumulada e direções de fluxo (MOORE et al., 1991), propriedades hidrológicas importantes para o cálculo de L em relevos complexos (MEDEIROS et al., 2016a). Medeiros et al. (2016a)

empregaram satisfatoriamente a equação de Desmet e Govers (1996) para o Estado de São Paulo considerando um MDE de 30 m.

A estimativa do comprimento de rampa é dada pela Equação 4.2:

$$L_{i,j} = \frac{(Ac_{i,j-i,n} + D^2)^{m+1} - (Ac_{i,j-i,n})^{m+1}}{(D^{m+2}) * (X_{i,j}^m) * (22,13)^m} \quad (4.2)$$

onde, $L_{i,j}$ é o comprimento da vertente de uma célula com coordenadas (i,j); $Ac_{i,j-i,n}$ a área de contribuição de uma célula com coordenadas (i,j); D é a resolução espacial do MDE (m); $x_{i,j}$ é a direção do fluxo; e m o coeficiente a ser determinado de acordo com a declividade (α) (Equações 4.3 e 4.4), sendo que: se $\alpha \geq 5\%$, $m = 0,5$; se $3\% \leq \alpha < 5\%$, $m = 0,4$; $1\% \leq \alpha < 3\%$, $m = 0,3$; e se $\alpha > 1\%$, $m = 0,2$. A declividade é estimada por,

$$S = 10,8 * \text{sen}(\alpha) + 0,03; \text{ se } \alpha < 9\% \quad (4.3)$$

$$S = 16,8 * \text{sen}(\alpha) - 0,5; \text{ se } \alpha \geq 9\% \quad (4.4)$$

onde, S é o fator inclinação da vertente (adimensional); e α o ângulo de inclinação ou declividade (graus).

3.3.3.4 Fator C e P

O fator C está associado às ações antrópicas, à cobertura e ao manejo da terra e representa a proteção do solo, quanto menor o fator C, maior a proteção contra processos erosivos (PRUSKI, 2009).

Analogamente à metodologia empregada para o fator K, para a elaboração do mapa do fator C foram associados, para cada classe de uso e cobertura do solo, valores de C presentes na literatura (Tabela 4.7). Esses valores foram aplicados para os anos de 1984, 1990, 2000, 2008 e 2010, com os dados de cobertura resultantes das etapas 4.2.2.3 e 4.2.2.4.

Tabela 4.7: Classes de uso e cobertura da terra.

Classe	Fator C	Referência
Floresta	0,001	Lencastre (1992)
Vegetação Secundária	0,003	Righetto (1998)
Pasto Limpo	0,085	Lencastre (1992)
Pasto Sujo	0,195	Lencastre (1992)
Agricultura	0,25	Amorim (2003)

Classe	Fator C	Referência
Floresta	0,0001	Medeiros (2016)
Vegetação Secundária	0,012	Santos (2013)
Pasto Limpo	0,143	Galdino (2012)
Pasto Sujo	0,610	Galdino (2012)
Agricultura	0,25	Amorim (2003)

A floresta possui valor bem baixo devido à sua proteção do solo, a Vegetação secundária por sua vez, possui um valor mais próximo à Floresta (Tabela 4.7). O Pasto Limpo, abordado na Tabela 4.7 – Tabela A – considera um percentual de solo revestido de no máximo 40% com cobertura rasteira. O Pasto sujo por sua vez considera um revestimento de aproximadamente 60%, com uma cobertura de vegetação (arbustos) de até 2m de altura (LENCASTRE, 1992; ALMEIDA et al. , 2016).

O fator P representa as práticas conservacionistas aplicadas a fim de minimizar os impactos causados pelo o uso da terra. Nesse estudo, considerou-se que as áreas de pastagens bem como as áreas agrícolas não apresentavam práticas agrícolas para a conservação. É preciso lembrar que a Agricultura Anual de larga escala abordada neste trabalho trata-se principalmente de milho e soja. Durante os trabalhos de campo realizados em 2016 e 2017, observou-se que a colheita é realizada de forma a deixar restos de cultura (aproximadamente 20 cm),o que poderia indicar uma possível prática de manejo. Entretanto, antes de um novo plantio são utilizados maquinários para preparação do solo, o que

descaracteriza, por exemplo, o plantio direto. Por isso neste trabalho foi atribuído o valor 1 ao fator P.

3.3.3.5 Estimativa de perda de solo

A taxa de perda de solo foi calculada com base nos dados anteriores, em uma resolução espacial de 30 m, sendo que o Fator R foi devidamente reamostrado. Como houve a utilização de dois diferentes mapas de solo para o fator K, assim como duas diferentes tabelas para os fatores K e C, foram gerados oito mapas de perda de solo por ano (Tabela 4.8). Entretanto, para a análise da trajetória de perda de solo item 4.2.4.1 foi utilizado um nono mapa, derivado da mediana dos oito mapas gerados. A opção pela mediana, ao invés da média, se dá porque ela representa o ponto (valor) em que ocorrem 50% dos valores estimados, sendo mais estável do que a média que pode sofrer perturbações por conta de valores extremos.

Tabela 4.8: Combinações para o cálculo da USLE

1)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela A	Fator K - Amz A
2)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela B	Fator K - Amz B
3)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela A	Fator K - Amz B
4)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela B	Fator K - Amz A
5)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela A	Fator K - ZEE Amz A
6)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela B	Fator K - ZEE Amz B
7)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela A	Fator K - ZEE Amz B
8)	Fator L	Fator S	Fator R	Fator C - Tabela B	Fator K - ZEE Amz A

Fonte: Produção da Autora.

Os fatores L, S e R, são os mesmo para as oito combinações, enquanto que para o fator C são utilizadas duas tabelas distintas e para o fator K são utilizadas duas tabelas e dois mapas distintos.

3.3.3.6 Mapa de incerteza

Para a estimativa de perda de solos foram utilizadas diferentes tabelas e mapas, o que gerou oito mapas distintos para cada ano. A fim de mostrar o impacto da escolha de valores e mapas de referência, foram elaborados os mapas de incertezas para cada um dos anos em que as taxas de perda de solo foram estimadas. Os mapas de incerteza indicam áreas onde houveram maiores variações no cálculo da taxa de perda de solo. Esses mapas foram gerados a partir da operação de diferença entre quartis, conforme Equação 4.5, em que,

$$Incerteza = Q_3 - Q_1 \quad (4.5)$$

Onde Q_3 é o terceiro quartil; e Q_1 é o primeiro quartil.

3.3.3.7 Padrões temporais de perda de solo

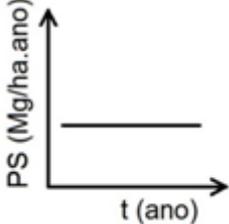
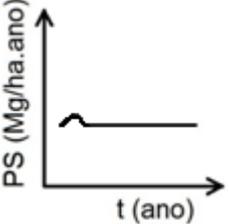
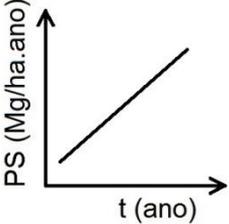
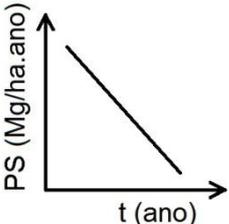
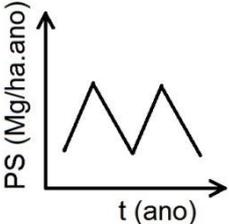
A construção da tipologia dos Padrões Temporais de Perda de Solo (PTPS) foi realizada em um plano celular. O uso da representação celular permite fixar uma região no espaço, de modo que seja possível observar a trajetória de Perda de Solo e de uso e cobertura da terra para os anos de 1984, 1990, 2000, 2008 e 2014.

A fim de integrar os dados de perda de solo no plano celular foi utilizada a operação de Soma, na qual os dados da grade de 30 m contidos em cada célula de 1 x 1 km foram somados em cada ano analisado⁷. Os dados de perda de solo para os cinco períodos foram incorporados no plano celular, e posteriormente foi observado o comportamento desse parâmetro para cada célula ao longo do tempo, a fim de identificar padrões semelhantes. Dada à variabilidade das estimativas das taxas de perda do solo nos anos analisados,

⁷ A reamostragem do dado para o plano celular de 1 x 1 km, tem como objetivo diminuir a variabilidade dos mesmos e assim reduzir a quantidade de tipos de trajetórias, capturando apenas as principais, simplificando a análise sem grandes perdas de informação.

cinco padrões foram encontrados conforme a tipologia apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Tipologia do Padrão Temporal de Perda de Solo

Gráfico	Padrão	Descrição do padrão
	Constante	Área onde o desgaste da camada superior do solo se manteve constante ao longo de toda a trajetória.
	Semi-constante	Área onde o desgaste da camada superior do solo se manteve praticamente constante ao longo da trajetória, com alteração apenas em um dos períodos.
	Crescente	Área com aumento do desgaste da camada superior do solo.
	Decrescente	Área com diminuição do desgaste da camada superior do solo.
	Dinâmico	Área com oscilação do desgaste da camada superior do solo.

Fonte: Produção da autora.

3.4 Análise integrada das trajetórias de perda de solos com as trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra

Nesta etapa, as células com as trajetórias de perda de solos foram confrontadas com as de mudança de uso e cobertura da terra. Essa análise possibilita identificar regiões na área de estudo onde as mudanças no uso e cobertura da terra podem afetar em maior ou menor grau a perda de solos. Um quadro geral foi construído e um mapa resultante da combinação dessas duas tipologias indica as áreas que apresentaram dinâmicas crescentes ou muito altas de perda de solo associadas às trajetórias de mudança da cobertura da terra.

Deve-se lembrar de que não apenas a cobertura da terra e as práticas de manejo das áreas agropastoris afetam a perda de solos, mas também as condições ambientais (relevo, solo e precipitação). Essas condições podem afetar o processo de perda de solos de forma diferenciada na área de estudo, reforçando ou atenuando esse processo.

Esses resultados permitiram apontar dinâmicas e padrões de mudança que permitiram discutir o processo de ocupação na região e de que forma o avanço do agronegócio e a conversão das áreas de floresta em outras coberturas afetaram a perda de solo. Essas análises são úteis para indicar regiões onde ocorreram trajetórias de maior ou menor perda de solo considerando as características espaciais da bacia, suas nascentes, a proximidade dos rios e da usina hidrelétrica, e a localização de Unidades de Conservação e das estradas, elementos podem afetar a qualidade da água e os fluxos hidrológicos dessa bacia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a metodologia e técnicas propostas. Na seção 5.1 serão apresentados os resultados obtidos com o TerraHidro para a extração de drenagem e a delimitação da bacia Curuá-Una. Essa etapa foi de fundamental importância, pois foi a partir dela que se delimitou a área de estudo.

Em seguida na seção 5.2 são apresentados os resultados do mapeamento do uso e cobertura da terra de 1984, dado ainda não disponível no TerraClass, e na sequência o resultado da reclassificação dos dados do TerraClass de 1990, 2000, 2008 e 2014, bem como o refinamento da classe mosaico de ocupações, realizado de forma automática. Os mapas de uso e cobertura da terra dessa seção são utilizados para compor o mapa de trajetória de uso e cobertura da terra através de um índice espacializado em um plano celular de 1x1km, apontando as áreas que para o período estudado diminuíram, aumentaram ou mantiveram sua cobertura vegetal.

A seção 5.3 apresenta primeiramente um panorama geral dos fatores e subsequentemente a mediana das taxas de perda de solo por ano com suas respectivas incertezas. Por fim os resultados da estimativa de perda de solo são utilizados para identificar e espacializar os padrões temporais de perda de solo em um plano celular de 1x1km.

Na seção 5.4 é realizada uma análise integrada em um plano celular (1x1km) sobre as trajetórias de uso e cobertura da terra e os padrões temporais de perda de solo para as células com hidrografia, as áreas protegidas, áreas da Agricultura Anual e a indicação de áreas potenciais para agricultura segundo o padrão encontrado nas análises.

4.1 Delimitação da bacia do Curuá-Una

Os resultados obtidos para a delimitação da bacia foram considerados satisfatórios, mesmo com a bacia inserida em uma área de planalto, em que a

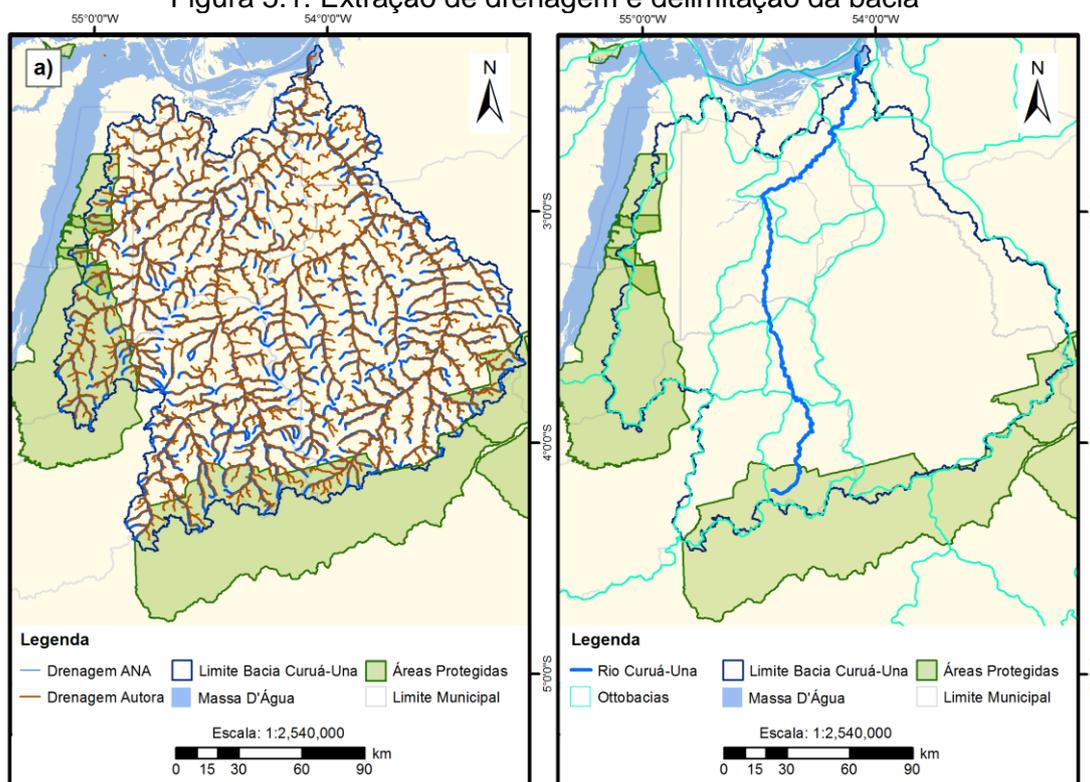
suavidade de terreno pode dificultar o cálculo da área de contribuição e, portanto a delimitação da drenagem. A avaliação dos resultados foi realizada visualmente devido à diferença de escala dos dados disponíveis. Primeiramente comparou-se a drenagem obtida no processamento com a hidrografia na escala 1:100.000 da Agência Nacional das Águas (ANA) (2016). Observou-se que os rios de menores ordens (ordens 1, 2 e 3) ficaram bem representados, enquanto que os de ordens maiores (acima da ordem 3) tiveram sua extensão menor do que os mapeados pela ANA na maioria dos casos (Figura 5.1 a). Observou-se ainda que não houveram casos de drenagem retilínea para a bacia como encontrado por Cardoso et al. (2015) e por Souza e Almeida (2014), que costumam ocorrer quando existem áreas planas ou fossos.

A partir da extração de drenagem (Figura 5.1 a) foi obtido o limite da bacia que teve como seu ponto de exutório a foz do rio Curuá-Una. Tal como para a drenagem, foi realizada a análise visual do resultado obtido com os limites das Ottobacias⁸ disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) (<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>) (MMA, 2018). Conforme é possível observar na Figura 5.1 b, os limites obtidos possuem maior semelhança na parte norte da bacia e uma maior divergência na parte nordeste.

A delimitação da bacia foi uma etapa de fundamental importância para a definição da área de estudo. O rio Curuá-Una tem sua nascente na Terra Indígena Cachoeira Seca, no município de Placas, cruza os municípios de Mojuí dos Campos, Santarém, Prainha e tem sua foz no rio Amazonas (Figura 5.1 b). O rio apresenta um barramento onde está instalada a Usina Hidrelétrica de Curuá-Una, em operação desde 1977 e com capacidade efetiva de produção energética de 30,3 MW (ELETROBRAS, 2017).

⁸ “São chamadas ottobacias as áreas de contribuição dos trechos da rede hidrográfica codificadas segundo o método de Otto Pfafstetter.” Divisão Hidrográfica por Ottocodificação - <http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/atlasrh2013/1-II-TEXT0.pdf>

Figura 5.1: Extração de drenagem e delimitação da bacia



a) Resultado obtido da extração de drenagem; b) Resultado obtido da delimitação da bacia.

Fonte: Produção da autora.

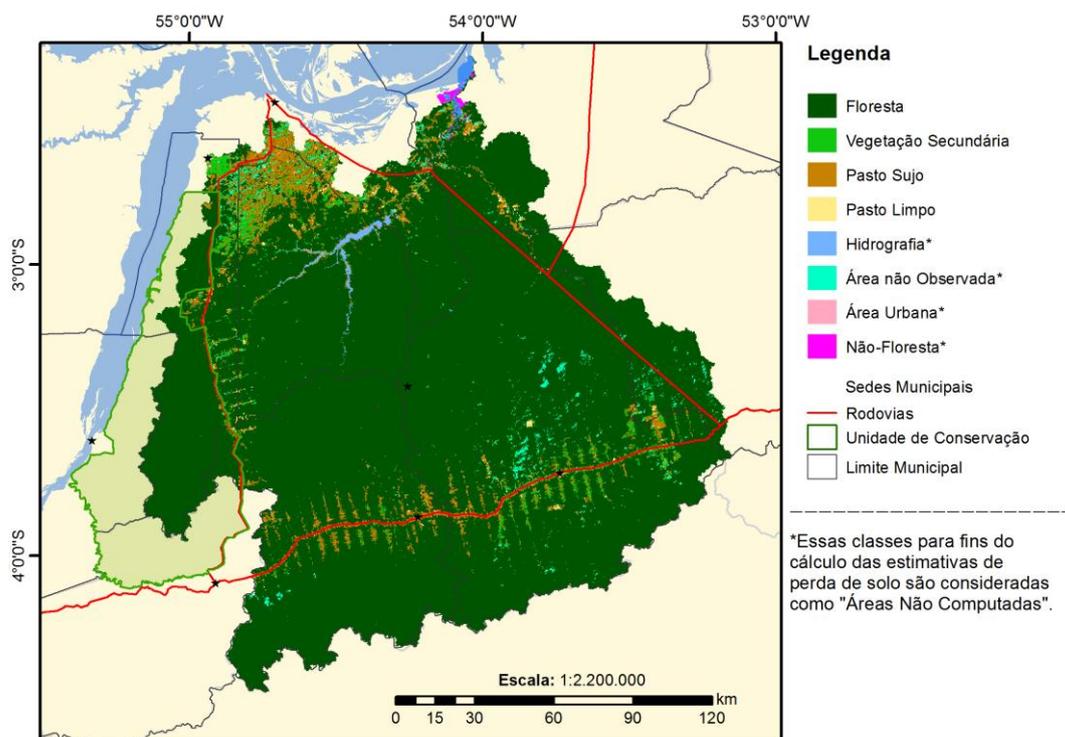
4.2 Mapeamento de uso e cobertura da terra

Nesta seção serão apresentados os mapas de uso e cobertura da terra que foram *input* para as seções 5.3 e 5.4. A seção 5.2.1 apresenta o mapa de uso e cobertura da terra para o ano de 1984, o único ainda não elaborado pelo TerraClass. O mesmo foi realizado a partir da máscara de desmatamento do PRODES do ano 2000. Para os mapas de 1990, 2000, 2008 e 2014 foi realizado um refinamento da classe Mosaico de Ocupação, apresentação na seção 5.2.2. Na seção 5.2.3 é realizado o agrupamento de classes do TerraClass de acordo com as classes propostas para esse trabalho e apresentado o mapa final de uso e cobertura da terra para os anos de 1990, 2000, 2008 e 2014. Ao final, na seção 5.2.4 é apresentado o resultado da trajetória de uso e cobertura da terra.

4.2.1 Mapeamento 1984

O mapeamento mostrou que as regiões mais próximas à sede de Santarém e também ao longo das rodovias BR-163 e BR-230 são as mais desmatadas, reflexo da ocupação antiga deste município (CHAVES, 1995) e das políticas públicas das décadas de 60 e 70 (BECKER, 2004; AB'SABER, 1989). No ano de 1984 aproximadamente 90% da bacia era coberta por floresta, sendo que nas áreas desmatadas a principal cobertura era Pasto Sujo (66,41%) seguido de Vegetação Secundária (28,16%) (Figura 5.2, Tabela 5. e 5.).

Figura 5.2: Mapa de Uso e Cobertura da Terra de 1984



Fonte: Produção da autora.

Para a avaliação dos dados produzidos no ano de 1984, não foram encontradas imagens de resolução espacial mais fina do que as já utilizadas no mapeamento. Também não existem dados de campo disponíveis para serem utilizados como referência na validação deste mapeamento. Assim, para a

avaliação desse dado foi realizado uma avaliação de concordância através da matriz de confusão apresentada na Figura 5.3 , que apresentou Kappa de 0,77.

As classes Pasto Limpo, Pasto Sujo e Vegetação Secundária por vezes se confundem no limiar de uma para outra. As maiores confusões ocorreram com a classe Vegetação Secundária, que confundiu majoritariamente com Pasto Sujo e em dois casos com Pasto Limpo. O Pasto Sujo por sua vez foi mais confundido com Vegetação Secundária e o Pasto Limpo confundido mais com Pasto Sujo. Isso ocorre devido por vezes a transição de, por exemplo, Pasto Sujo para Vegetação Secundária ser confusa até mesmo em uma classificação manual.

Figura 5.3: Matriz de confusão do mapeamento de 1984

		Referência - Fotointerprete				
		Área Urbana	Área Não-Observada	Pasto Limpo	Pasto Sujo	Veg. Secundária
Classificação	Área Urbana	3				
	Área Não-Observada		25			1
	Pasto Limpo		1	25	3	
	Pasto Sujo			1	17	3
	Veg. Secundária			2	9	24

Fonte: Produção da Autora.

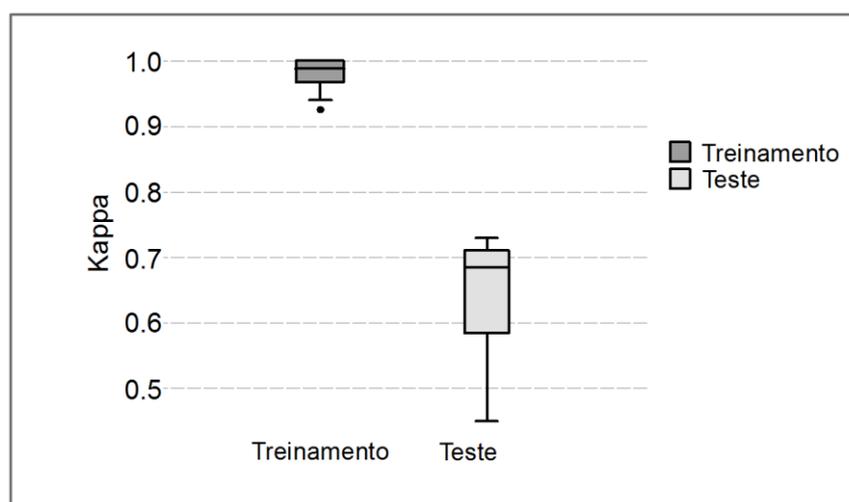
4.2.2 Reclassificação da classe mosaico de ocupações

Para atender os objetivos deste trabalho foi realizada a reclassificação da classe Mosaico de Ocupação dos dados do TerraClass de 1990, 2000, 2008 e 2014. A área da classe Mosaico de ocupação variou em relação à sua área ao longo dos anos, sendo de 1.997,34 km² para 1990, 2.536,45 km² para 2000, 1.353,16 km² para 2008 e 232,54 km² para 2014.

Durante reclassificação foram geradas dez árvores de decisões pelo *Boosting*, que apresentaram Kappa para as amostras de treinamento próximo a 1 e Kappa entre 0,45 e 0,73 para as amostras de teste. O gráfico da Figura 5.4 mostra o boxplot do Kappa estimado das amostras de treinamento e de teste. Foi selecionada a árvore que teve o Kappa maior estimado com as amostras de treinamento igual a 1 e o maior valor de Kappa estimado com as amostras

de teste que foi 0,73. A classe com maior confusão foi o Pasto Sujo, que foi confundido com Pasto Limpo e Vegetação Secundária. Em contrapartida a classe Vegetação Secundária foi a que teve menor confusão (Figura 5.5).

Figura 5.4: Kappa dos Classificadores *Boosting*



Fonte: Produção da autora.

Figura 5.5: Matriz de confusão da Validação

		Referência		
		Pasto Limpo	Pasto Sujo	Veg. Secundária
Classificação	Pasto Limpo	15	3	0
	Pasto Sujo	2	11	1
	Veg. Secundária	0	4	20

Fonte: Produção da Autora

A classificação apresentou como classe predominante em termos de área, nos anos de 1990, 2000 e 2014, a classe Pasto Sujo e, para o ano de 2008, a classe Vegetação Secundária (Tabela 5.1). A classe Pasto Limpo apresentou valores maiores de área, em relação as demais classes, apenas no ano de 2014, representando quase 22% da área da classe de Mosaico de Ocupações. Entretanto, neste ano a área de Mosaico de Ocupações mapeada na bacia foi

reduzida, de aproximadamente 10% da área de Mosaico de Ocupações do ano 2000. Os dados mostram que a composição da classe Mosaico de Ocupação é variável nos anos, sendo o pasto sujo a cobertura que predomina na maior parte dos anos.

Tabela 5.1: Reclassificação do Mosaico de Ocupação

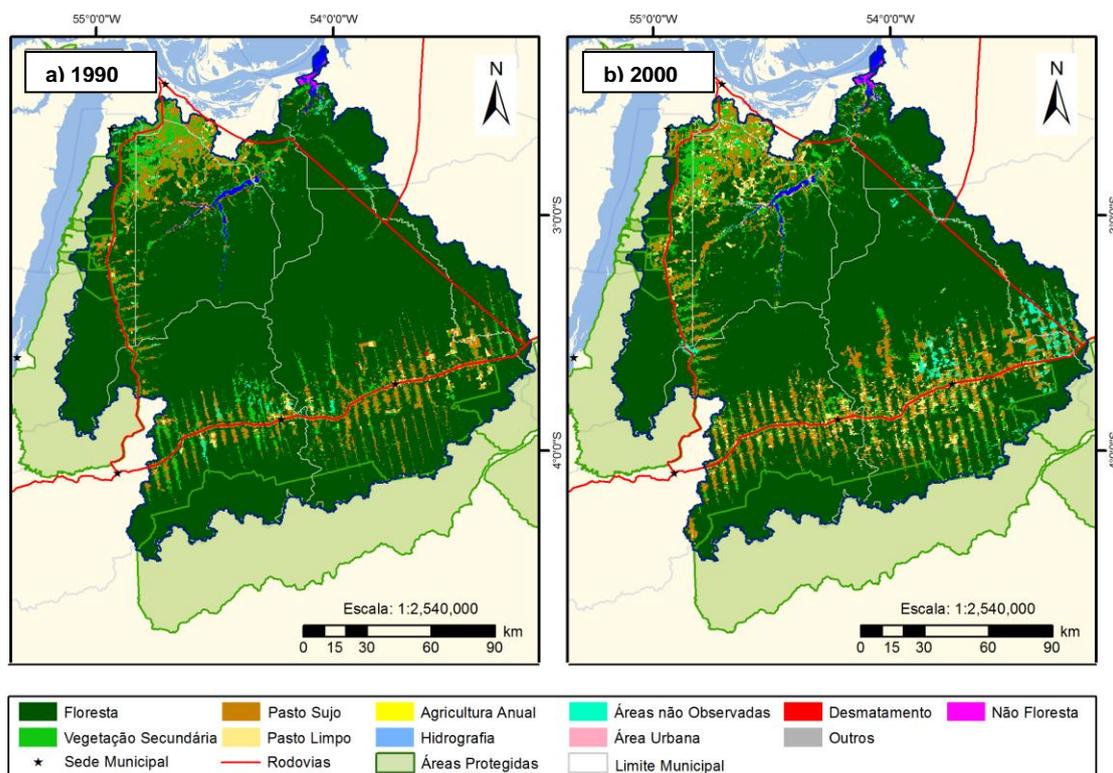
	1990 (%)	2000 (%)	2008 (%)	2014 (%)
Vegetação Secundária	34.38	38.64	75.46	29.17
Pasto Sujo	63.88	59.18	17.81	48.90
Pasto Limpo	1.73	2.17	6.73	21.93

Fonte: Produção da autora

4.2.3 Uso e cobertura da terra na bacia do Curuá-Una

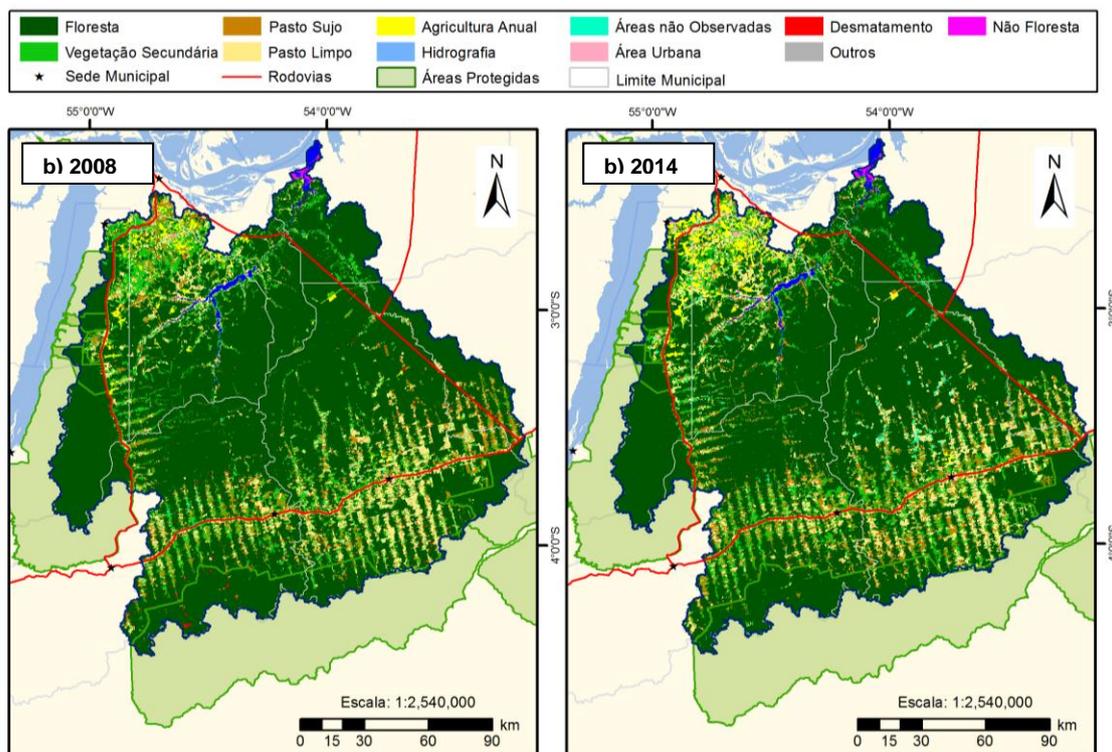
Os mapas de uso e cobertura resultantes da classificação da Bacia Curuá-Una são apresentados na Figura 5.6 que possibilita observar, juntamente com a Tabela 5.2 o aumento da área desmatada acumulada, que passou de 7,86% em 1984 para 26,51% em 2014 em relação à área total da bacia.

Figura 5.6: Mapas de Uso e Cobertura da Terra para os anos de 1991, 2000, 2008 e 2014.



(continua)

Figura 5.6 - Conclusão.



Fonte: Produção da Autora.

Acompanhando o aumento do desmatamento, nota-se que as áreas das classes Pasto Limpo e Agricultura Anual também aumentaram ao longo do período analisado (Tabela 5.3). A classe Agricultura Anual, que teve início nos anos 2000, cresceu 14.800% (catorze mil e oitocentos por cento), no período de 2000 até 2014 o equivalente a aproximadamente 1.000% ao ano. Em contrapartida, a área da classe Pasto Sujo diminuiu ao longo do tempo, sendo mais presente nos anos iniciais, em 1984, 1990 e 2000 e como uma possível indicação da conversão da mesma por intensificação do uso da terra, por exemplo, a implantação de pastos para pecuária.

Souza et al. (2017) em estudo realizado para a região apontaram um grau de intensificação do uso da terra de médio pra alto ao longo da BR-230 para o ano de 2012. Tal fato pode nos ajudar a compreender a baixa oscilação dos percentuais de Vegetação Secundária, Pasto Sujo e Pasto Limpo entre os anos de 2008 e 2014 (Tabela 5.3).

A Vegetação Secundária, para os anos de 2008 e 2014 foi a cobertura que apresentou maior área, seguida por Pasto Limpo (Tabela 5.3), e que menos oscilou ao longo de todo período de estudo. Entretanto conforme pode se notar nas Figuras 5.2 e 5.6, a Vegetação Secundária deixa de estar concentrada ao norte da região do Polo do Grãos e se dá de maneira mais espalhada entre os municípios de Belterra, Mojuí dos Campos e Santarém.

Tabela 5.2: Cobertura da Terra na Bacia do Curuá-Una

	1984 (%)	1990 (%)	2000 (%)	2008 (%)	2014 (%)
Floresta	90,27	85,34	78,56	74,45	72,12
Área não Observada	1,17	0,67	1,53	0,15	0,58
Área não Computada	0,71	0,73	0,83	0,79	0,78
Área Desmatada	7,86	13,26	19,08	24,61	26,51

Fonte: Produção da Autora

Tabela 5.3: Uso e Cobertura da Terra nas Áreas Desmatadas na Bacia do Curuá-Una

	1984 (%/km ²)	1990 (%/km ²)	2000 (%/km ²)	2008 (%/km ²)	2014 (%/km ²)
<i>Vegetação Secundária</i>	28,2/692	40/1658	32,5/1.938	41,4/3.184	36,9/3.059
<i>Pasto Sujo</i>	66,4/1.631	51,9/2.153	52/3.102	20,7/1.594	22,8/1.892
<i>Pasto Limpo</i>	5,1/126	6,7/278	15,3/912	31,5/2.424	33,4/2.763
<i>Agricultura</i>	0/0	0/0	0/0	3,5/268	5,9/490
<i>Área Urbana*</i>	0,3/6,8	0,2/7,5	0,1/7,5	0,3/22,4	0,5/42,9
<i>Desmatamento do ano*</i>	0/0	1,2/48,49	0/0,7	2,6/198	0,4/35,8

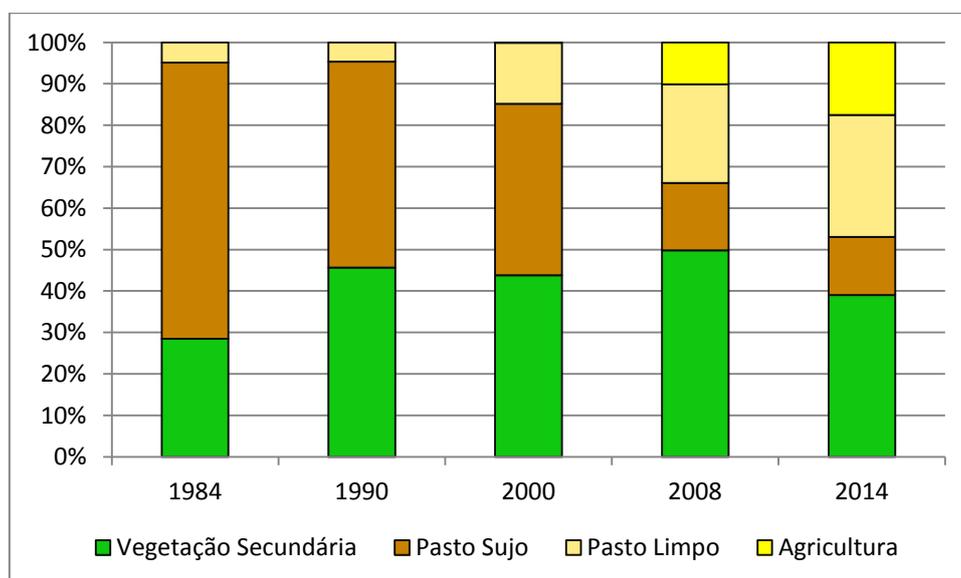
* Classes consideradas como "Área não Computada" no cálculo de estimativa de perda de solo.

Fonte: Produção da Autora.

Na região do Polo dos Grãos (Santarém, Mojuí dos Campos e Belterra), nota-se um aumento da área de Pasto Limpo, de 780,5 km², e Agricultura de 469 km², do ano de 1984 a 2014 e de 2000 a 2014, respectivamente, como mostra o gráfico da Figura 5.7 e a Tabela 5.8. Nessa região, a Agricultura Anual (principalmente a soja) foi introduzida no final dos anos 90. Um estudo

preliminar realizado em Santarém pela Agrária e Quincó (1997), verificou a viabilidade de se plantar soja na região com ganhos e produtividade similares a outras regiões do país. A viabilidade da produção de soja na região ocorre devido melhoramentos nas semente às condições climáticas adequadas, à possibilidade de mecanização e também a razões econômicas, tal como o menor gasto com frete se comparado à soja do Mato Grosso, por conta da proximidade com o porto e, também em relação ao menor preço da terra (AGRÁRIA E QUINCÓ, 1997; TOLEDO, 2011).

Figura 5.7: Distribuição da Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo e Agricultura nas áreas desmatadas para a Região do Polo dos Grãos.

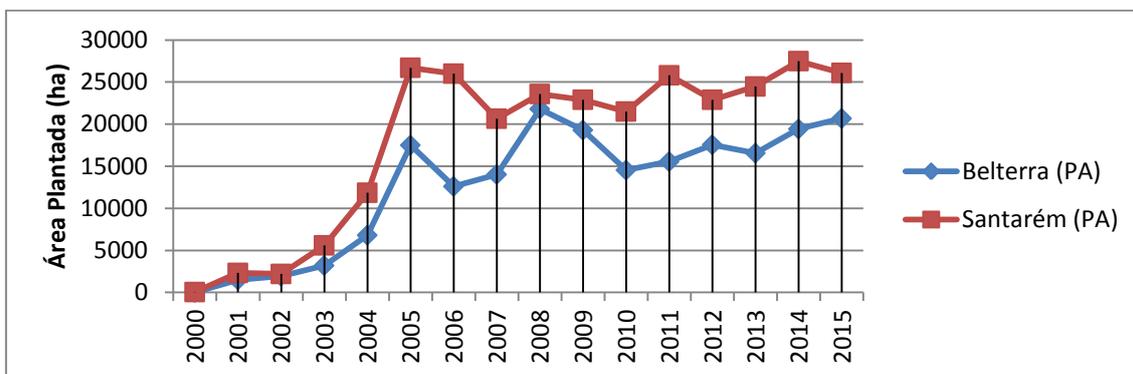


Fonte: Produção da Autora.

O crescimento da Agricultura Anual apresentado nos mapas de uso e cobertura da terra produzidos neste trabalho é coerente com os dados de Produção Agrária Municipal (PAM) do IBGE (IBGE, 2018), de acordo com a Figura 5.8. Dados de produção de soja comprada pela Cargill da região do Polo dos Grãos (Belterra, Santarém e Mojuí dos Campos), mostram que em 2003 a produção

comprada foi de 7 mil ton; em 2008, 41 mil ton; em 2014, 128 mil ton; e em 2017, quase 200 mil ton de soja (CARGILL, 2017).

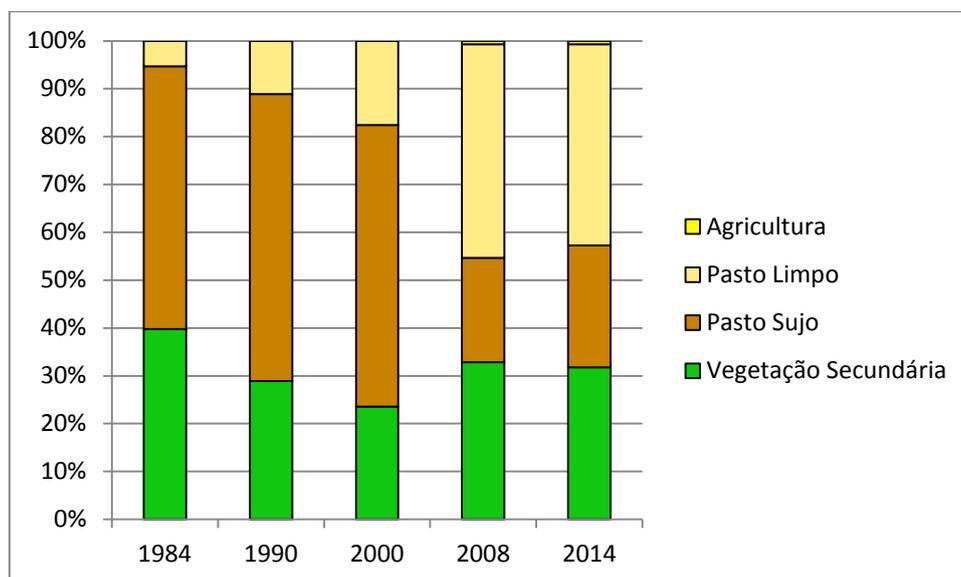
Figura 5.8: Produção de Soja e Milho na região do Polo dos Grãos.



Fonte: IBGE (2018)

Nas fazendas localizadas na Transamazônica, nos municípios de Uruará, Medicilândia e Placas foi observado, para o ano de 1993, que as áreas desmatadas foram, em geral, convertidas, 40% para pastagens, 25% para culturas perenes e 35% para vegetação secundária (WALKER et al., 1997). Para este trabalho no ano de 1990 em Uruará o percentual de Vegetação Secundária nas áreas desmatadas era de 27,8%, de Pasto Sujo era de 57% (Figura 5.9 e 5.10). Placas, município vizinho de Uruará, cortado pela Transamazônica, apresentou 38% de vegetação secundária e 46,6% de Pasto Sujo nas áreas desmatadas (Figura 5.9 e 5.10).

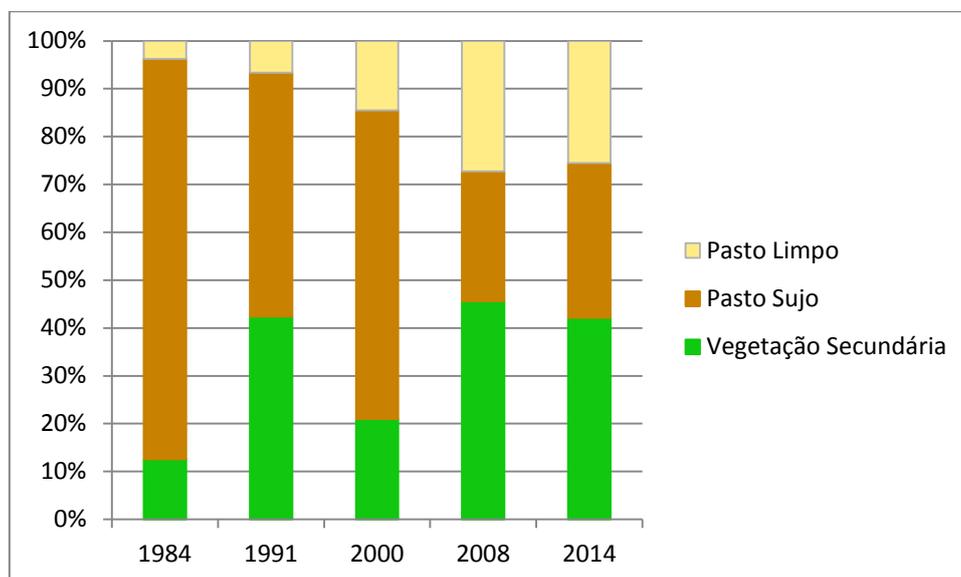
Figura 5.9: Distribuição da Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo e Agricultura nas áreas desmatadas para o município de Uruará.



Fonte: Produção da Autora.

Para os anos de 2000, 2008 e 2014, observou-se principalmente em Uruará um aumento do Pasto Limpo, que em 2000 representava 15,4% da área desmatada e para os anos de 2008 e 2014 representava respectivamente 43,1% e 40,3% (Figura 5.9 e 5.10). Esse aumento do Pasto Limpo pode estar associado ao fato de que o município apresenta forte atividade pecuarista com um efetivo bovino em 2000, de 95.345 cabeças de gado e apresentando um aumento de 206,12% (291.868 cabeças de gado) no ano de 2008 (IBGE, 2018).

Figura 5.10: Distribuição da Vegetação Secundária, Pasto Sujo, Pasto Limpo e Agricultura nas áreas desmatadas para o município de Placas.



Fonte: Produção da Autora.

O município de Placas, apesar de ter apresentado um aumento da área de Pasto Limpo, não chegou a apresentar valores superiores a 25%, sendo a classe Pasto Sujo a mais representativa em relação ao percentual nas áreas desmatadas até o ano 2000 (Figura 5.9). Para o ano de 2008 e 2014, a classe mais representativa foi a Vegetação Secundária. Esse aumento da Vegetação Secundária pode ser explicado por uma combinação de acontecimentos. Por exemplo, um abandono de terras onde era plantado arroz, que teve a plantação reduzida em 1.000 hectares de 2008 para 2014 (Tabela 5.4). O município também apresentou um aumento da área de plantação de mandioca e cacau e ambas as culturas possuem padrões espectrais semelhantes às áreas de vegetação secundária (Tabela 5.4).

Placas, ao contrário da maioria dos municípios, apesar de ter apresentado aumento na área de Pasto Limpo, ao longo dos anos analisados, esse aumento não chegou a representar 30% das áreas desmatada. A diferença no padrão de mudança de uso e cobertura da terra do município de Placas, pode se justificar por conta da sua maior declividade o que torna boa parte das suas terras inviáveis para a Agricultura anual de larga escala (ALVES et al., 2010).

Tabela 5.4: Dados de Produção Agrícola Municipal

Arroz (em casca)	1990 (ha)	2000 (ha)	2008 (ha)	2014 (ha)
Medicilândia (PA)	4200	400	1205	100
Placas (PA)	0*	1500	2100	1100
Uruará (PA)	4450	2500	1080	800

Mandioca	1990 (ha)	2000 (ha)	2008 (ha)	2014 (ha)
Medicilândia (PA)	1600	1500	1200	1315
Placas (PA)	0*	200	450	1200
Uruará (PA)	2500	1300	1000	1250

Cacau (em amêndoa)	1990 (ha)	2000 (ha)	2008 (ha)	2014 (ha)
Medicilândia (PA)	8400	10304	18930	36713
Placas (PA)	0*	1717	3329	7400
Uruará (PA)	4169	5220	8065	11905

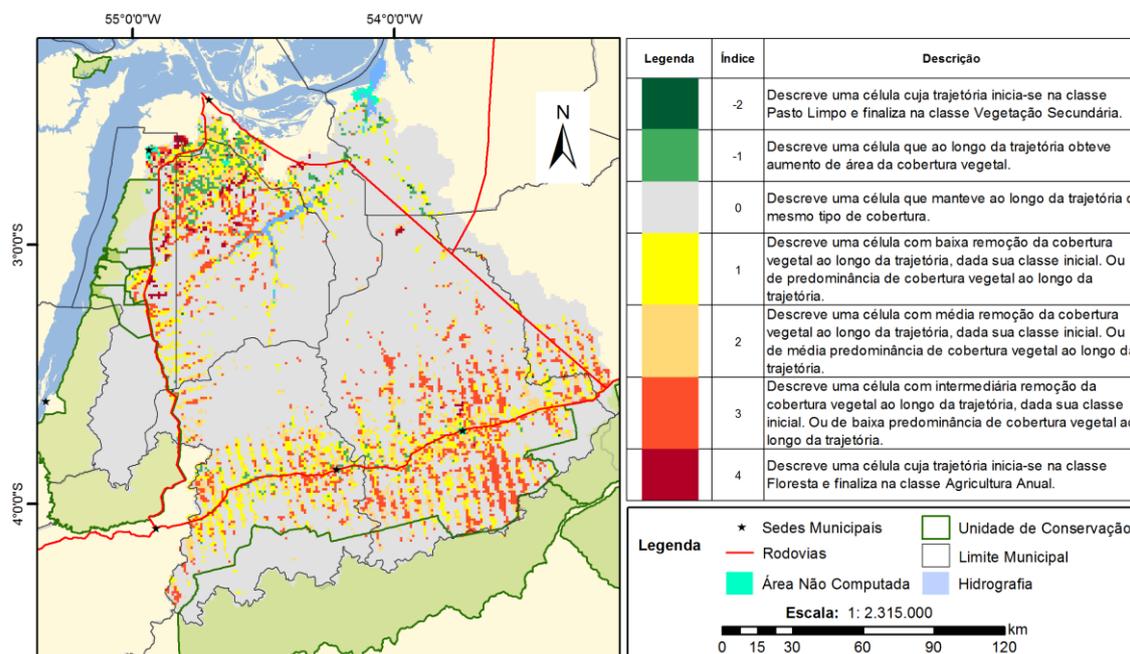
* Só passou a existir como município em 1993, através da Lei Estadual nº 5.783, de 20 de dezembro de 1993.

Fonte: IBGE, 2018.

4.2.4 Trajetória de mudança de uso e cobertura da terra

Os resultados das análises de trajetória de mudança de uso e cobertura da terra mostraram que 76% da área da bacia se mantiveram constantes, ou seja, apresentou a mesma cobertura nos cinco anos de análise. A cobertura dominante para essas áreas foi a cobertura Florestal, representando 98% da área constante, como mostra a Figura 5.11.

Figura 5.11: Trajetória de Uso e Cobertura da Terra



Fonte: Produção da Autora.

Com relação às demais trajetórias pode-se destacar a presença e predominância de algumas delas por regiões. Na região produtora de grãos, que envolve o município de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos, por exemplo, podemos observar trajetórias que representam a conversão, ao longo do tempo, de áreas Florestais para agricultura entre os anos de 1984 a 2014, representada pelo Índice 4. São áreas que se localizam próximas de áreas florestais (que não apresentaram mudanças no período analisado), representando as áreas de expansão agrícola. Essa mesma região apresenta trajetória predominante, associada ao Índice 1, de baixa perda de cobertura vegetal, que pode ser explicada pelas transições das áreas de pasto sujo ou de pasto limpo do para Agricultura Anual. A região apresenta ainda trajetórias ligadas à agricultura de pequena escala expressas por trajetórias de baixa remoção da cobertura vegetal, trajetória 1, ou pela trajetória -1, que representa o aumento da cobertura vegetal. Nessa região, os pequenos produtores convivem com agricultura de larga escala, que se expande pelo território

incorporando as terras dos pequenos agricultores, que ainda plantam frutas e a mandioca para a produção de farinha em um sistema itinerante, em que a regeneração faz parte do ciclo agrícola, que tem o papel de recuperar a fertilidade do solo (CÔRTEZ; D'ANTONA, 2010).

Diferentemente dessa região, no entorno da rodovia Transamazônica, as trajetórias -1 e -2, são mais raras. Em Uruará e Medicilândia, foram encontrados dois padrões predominantes, o representado pelo Índice 0, que descreve uma trajetória constante, e aquele representado pelo Índice 3, que descreve a conversão de áreas de Floresta em pastagem, em especial nessa região, para Pasto Limpo. Os resultados mostraram que a área de Pasto Limpo no município passou de 5% para 42%, de 1984 para 2014, enquanto que nesse mesmo período, a classe Pasto Sujo se reduziu-se pela metade, passando de 55% em 1984 para 25% em 2014, gerando trajetórias de moderada remoção de vegetação ou com presença ao longo do tempo de vegetação de menor porte.

O padrão de trajetória predominante no município de Placas foi representado pelo Índice 1, que apresenta persistência de vegetação ou baixa remoção da cobertura vegetal. Devido ao relevo movimentado essa área não apresenta áreas de Agricultura Anual, apenas agricultura familiar ou de pequena escala, com predomínio de Vegetação Secundária e Pasto Sujo ao longo do tempo (DAL'ASTA, 2014; ALVES et al., 2010). Esse padrão corrobora com os padrões identificados por Souza et al.(2017) ao longo da rodovia Transamazônica para o município de Placas, que mapeou sistemas produtivos relacionados com a agricultura familiar, que apresentam uma combinação de usos e coberturas da terra como Pasto Sujo, Pasto Limpo e Vegetação Secundária. Ao longo da trajetória de 1984 a 2014, em Placas, houve um aumento da classe de Vegetação Secundária de 235%, sendo que em 1984, 12% da cobertura era de Vegetação Secundária passando em 2014 para 42% (Figura 5.10).

A parte do município de Prainha pertencente a bacia do Curuá-Una apresentou uma maior cobertura vegetal ao longo da trajetória, e isso fica evidenciado uma

vez que as trajetórias de predominantes são associadas aos Índices -2, -1 e 1. Os Índices -2 e -1 mostram que a região teve um aumento da cobertura vegetal ao longo dos anos, indicando por exemplo, que áreas de Pasto Limpo e de Pasto Sujo foram convertidas para Vegetação Secundária. Nessas áreas, provavelmente ocorre a predominância de plantio de mandioca em um sistema itinerante.

4.3 Estimativa de perda de solo

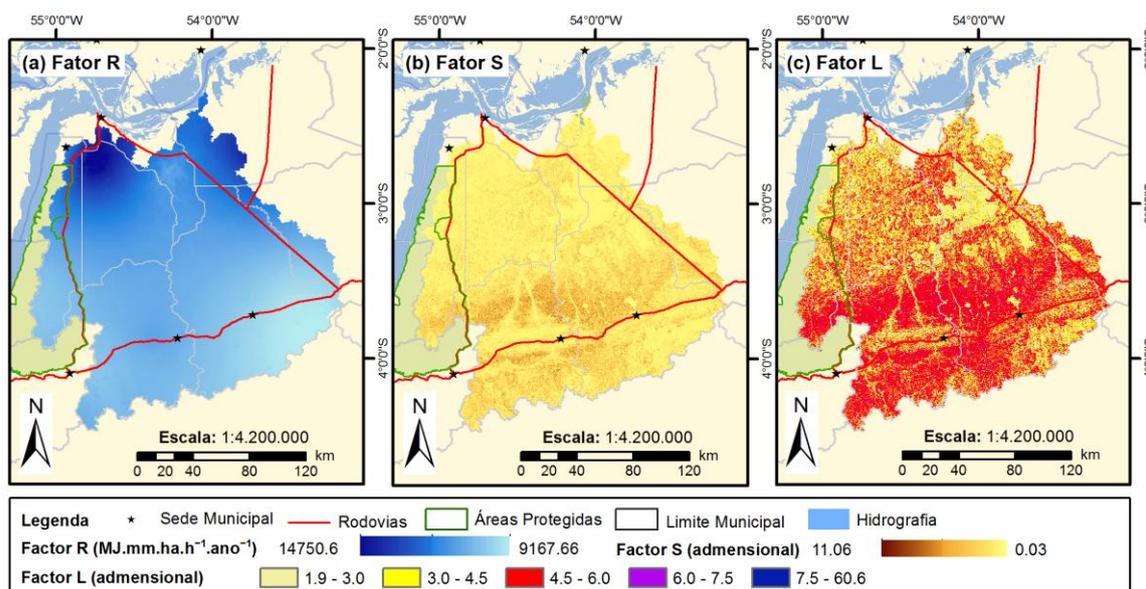
4.3.1 Fatores USLE

Os valores estimados de erosividade (Fator R) para a bacia do Curuá-Una a partir dos dados do WorldClim (1950-2000) foram de $9.000 \text{ MJ.mm.ha.h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ a aproximadamente $15.000 \text{ MJ.mm.ha.h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. A Figura 5.12 a apresenta a distribuição espacial desses valores na bacia, se comparada com outras regiões do Brasil esses valores podem ser considerados altos, entretanto para a região Amazônica eles estão na média. Valores semelhantes foram encontrados por Mello et al. (2013) para a região da bacia do Curuá-Una, variando de 12.000 a $14.000 \text{ MJ.mm.ha.h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, em cálculo da erosividade a nível Brasil por um modelo multivariado, com dados de precipitação de estações pluviométricas que possuíam séries históricas consistentes por um período mínimo de 15 anos. Martorano et al. (2017) classificaram a suscetibilidade dos solos quanto ao processo erosivo da chuva na Amazônia brasileira através das variáveis de precipitação (1961 – 1990) e declividade. Os resultados apontaram a região onde está localizada a bacia do Curuá-Una como um potencial erosivo predominantemente alto e muito alto, com exceção da área da FLONA.

O Fator S que representa a declividade, variou de 0 a 11, enquanto o Fator L, que representa o comprimento de rampa, variou na área de estudo, de 1,9 a 60. Esses fatores são correlacionados e mostraram ter comportamento espacialmente semelhante (Figura 5.12 b, c). Os valores mais baixos dos

Fatores L e S estão ao norte da bacia, região onde está localizada a região de produção de grãos. Por outro lado, Placas e Uruará têm os maiores valores para o Fator L e S, sendo que em Uruará os maiores valores estão distribuídos ao longo das viciniais da rodovia BR-230. No entorno da barragem da hidrelétrica de Curuá-Una, o Fator L apresenta valores intermediários predominantes, enquanto o Fator S possui valores baixos e, na região à jusante apresenta valores altos.

Figura 5.12: Fatores R, S e L.



a) Mapa Fator R (erosividade); b) Mapa de Comprimento da Fator S (comprimento de rampa); e c) Mapa do Fator L (declividade).

Fonte: Produção da Autora.

A região do Pólo de Grãos e o município de Prainha são formados predominantemente por Latossolo Amarelo, que são solos com um fator de erodibilidade menor (0,078750 – Tabela 4.5; 0,0246 – Tabela 4.6), recomendado para agricultura e pastagens (VENTURIERI et al., 2010). No entanto, nos municípios de Placas, Uruará e Medicilândia os solos predominantes são Argissolo Vermelho e Vermelho-Amarelo, que são solos

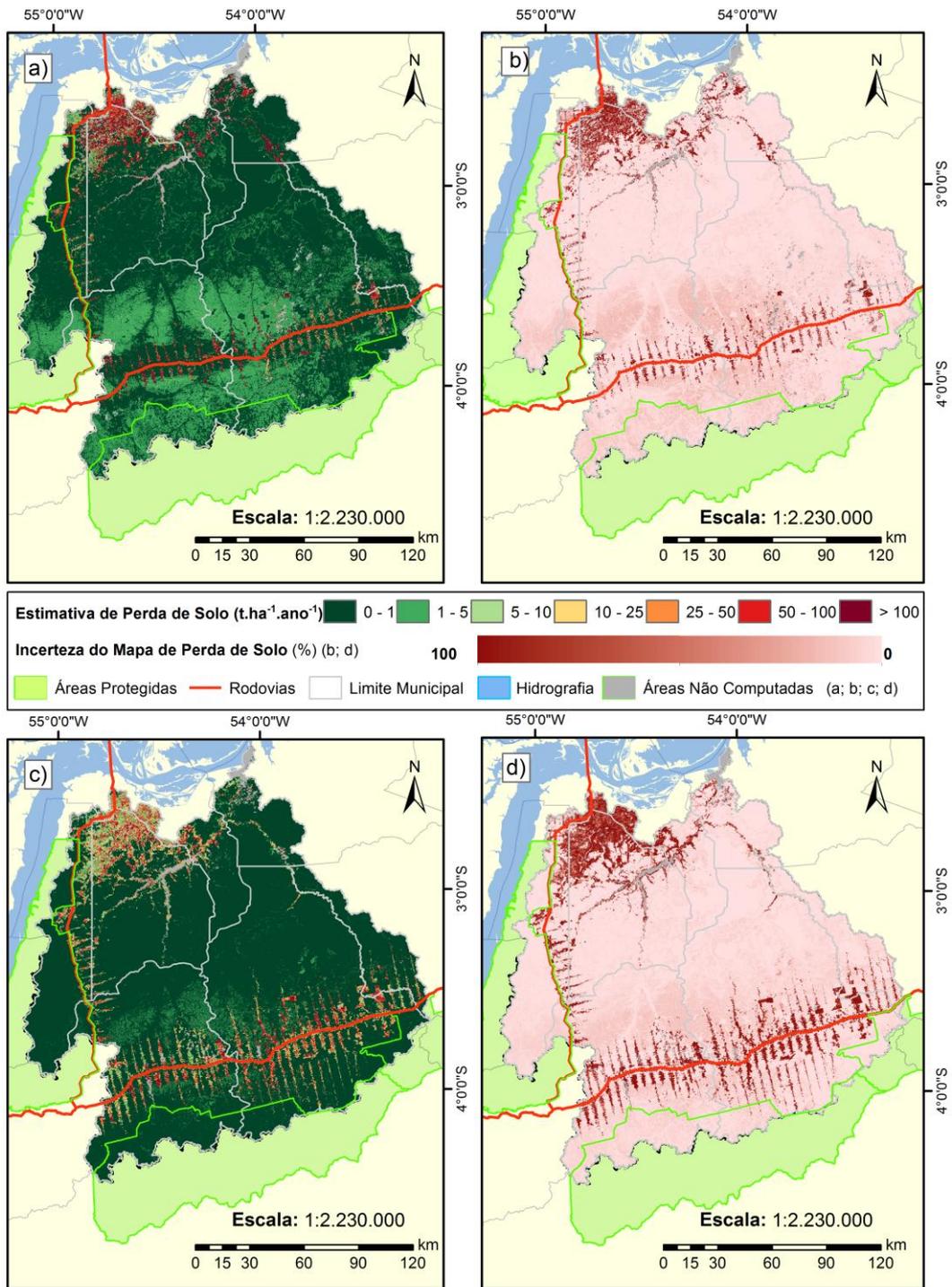
naturalmente mais erosivos e as indicações de uso da terra para essas regiões são dadas principalmente em função do relevo (Venturieri et al., 2010). Nas duas tabelas distintas utilizadas (Tabela 4.5 e 4.6), as maiores diferenças entre valores foram para os Neossolos, Gleissolo, Latossolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo. O Argissolo Amarelo presente nos dois mapas é o mais erodível de acordo com ambas as tabelas.

4.3.2 Estimativa de perda do solo e mapa de incerteza

A taxa de perda de solo aumentou em 243% de 1984 para 2014, de acordo com o mapa derivado da mediana dos oito mapas gerados. Os mapas da Figura 5.13 e a Tabela 5.5 apresentam os resultados das estimativas das taxas de perda de solos e as incertezas calculadas para os anos de 1984, 1990, 2000, 2008 e 2014.

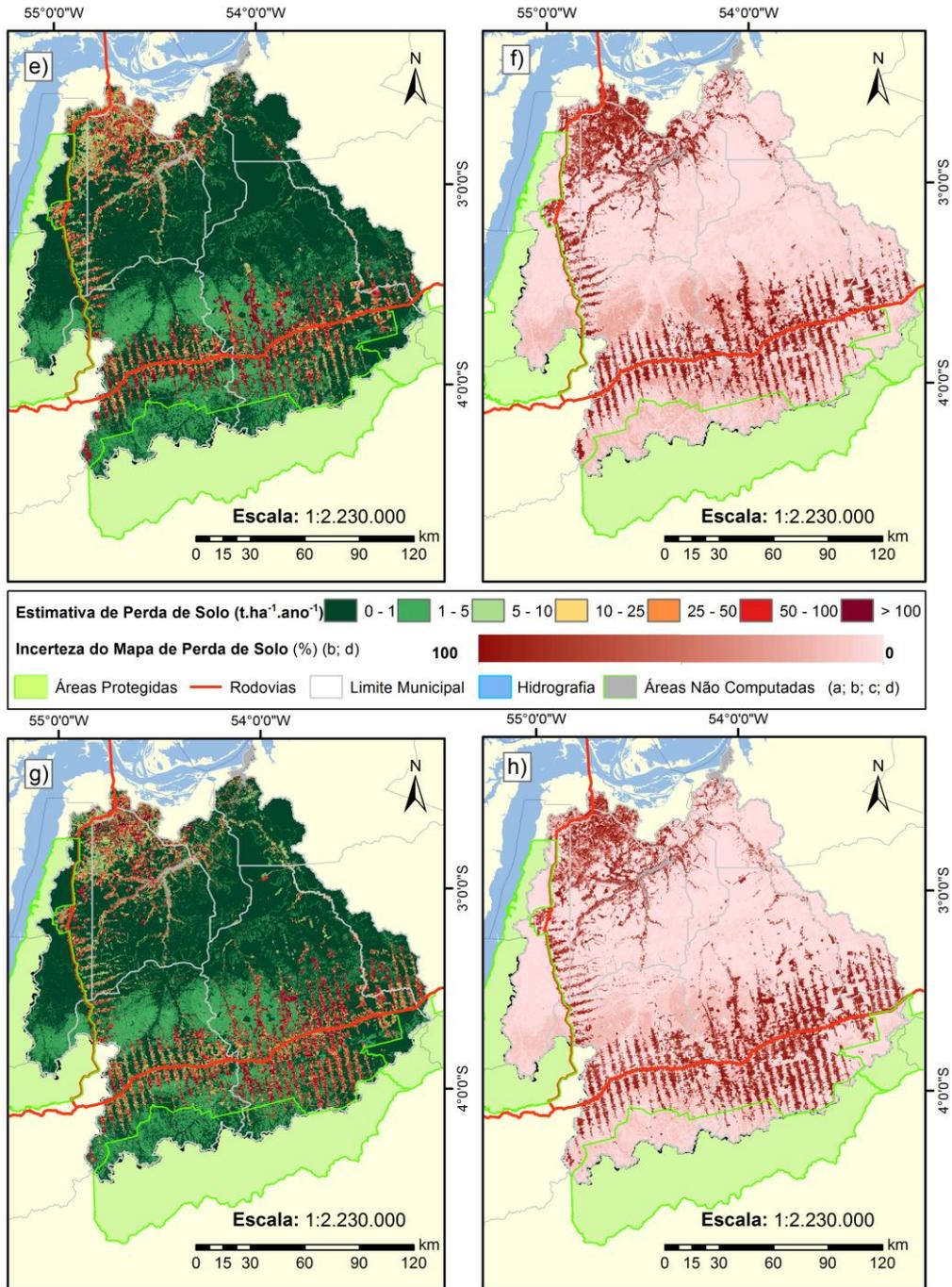
Os municípios de Placas e Uruará destacam-se por apresentarem uma declividade mais acidentada ao longo da Rodovia Transamazônica (BR-230). No restante da bacia, uma vez que o Fator C, que representa o uso e cobertura da terra, é o único que varia no tempo, observa-se uma forte influência da sua mudança com a variação das taxas de perda de solo. Silva (2012) e Santos (2013) em estudos realizados no Pará, também identificaram em seus respectivos trabalhos que os fatores associados ao uso e cobertura da terra e à declividade são os mais relevantes no cálculo da taxa de perda de solo.

Figura 5.13: Mapas de Taxas de Perda de Solo e Incertezas



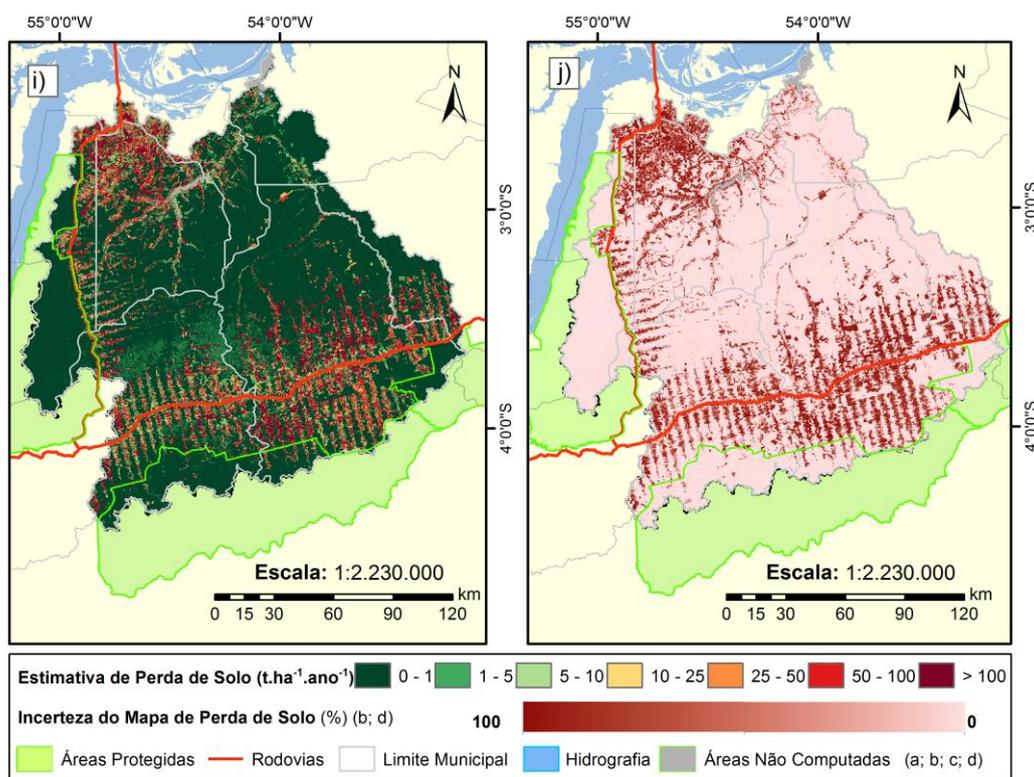
(continua)

Figura 5.13: Continuação.



(continua)

Figura 5.13: Conclusão.



- a) Mapa de estimativa das taxas de perda de solo 1984; b) Mapa de incerteza 1984; c) Mapa de estimativa das taxas de perda de solo 1990; d) Mapa de incerteza 1990; e) Mapa de estimativa das taxas de perda de solo 2000; f) Mapa de incerteza 2000; g) Mapa de estimativa das taxas de perda de solo 2008; h) Mapa de incerteza 2008; i) Mapa de estimativa das taxas de perda de solo 2014; j) Mapa de incerteza 2014;

Fonte: Produção da Autora.

Tabela 5.5: Média da taxa de perda de solo por município.

	1984	1990	2000	2008	2014
	Taxa de Perda de Solo (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)				
MOJÚ DOS CAMPOS	16.74	18.18	30.80	40.12	60.64
SANTARÉM	26.67	22.24	28.93	36.48	45.72
BELTERRA	9.23	12.65	18.27	22.83	31.92
MEDICILÂNDIA	4.45	12.90	21.75	43.12	45.56
PLACAS	13.26	21.78	46.66	44.85	59.51
PRAINHA	15.05	4.26	6.94	7.10	7.35
URUARÁ	9.87	23.21	53.74	66.73	76.51

Fonte: Produção da Autora.

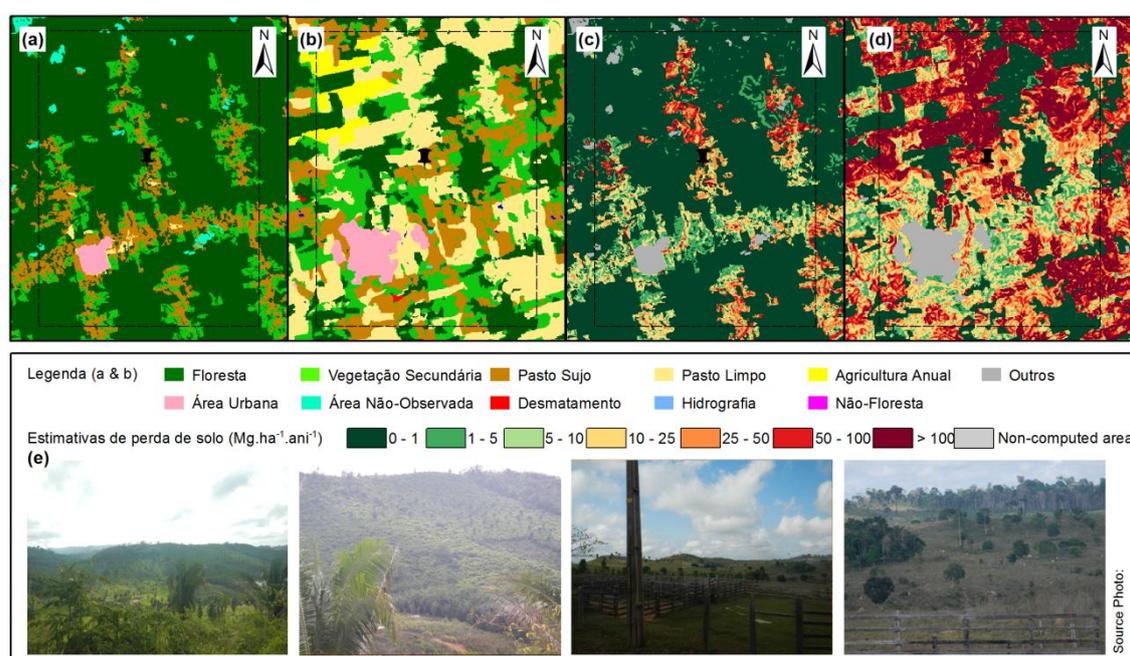
Os maiores aumentos das médias da taxa de perda de solo foram encontrada nos municípios de Medicilândia e Uruará, que tiveram um aumento de 922% e 675% respectivamente (Tabela 5.5). Uruará apresentou um aumento da área de pastagem, e além dos dados do aumento do efetivo bovino já discutido, foi observado em campo, a presença de atividades de pecuária nas áreas com declividade moderada, tal como apresentado na Figura 5.14 e. Nessa região, podemos observar a mudança no uso e cobertura de 1984 para 2014, e respectivo aumento das taxas de perda de solo (Figura 5.14 a & b).

As taxas de perda de solo estimadas no município de Uruará são consideradas altas, de $76 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (Tabela 5.5), principalmente se considerarmos que o município possuía 70% de sua área com floresta em 2014. A figura 5.14 mostra o aumento da taxa de perda de solo de 1984 (c) para 2014 (d). Em um estudo para algumas sub-bacias do rio Jauru (MT) realizado por Neves et al. (2011), em local com e tipos de uso e cobertura da terra similares aos de Uruará, a taxa de perda de solo estimada foi de 22 vezes menor do que a taxa de Uruará para 2014. Neste estudo o solo em mais de 80% da bacia apresentou alta erodibilidade, mas a erosividade, se comparada a bacia do Curuá-Una, é baixa de $768 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ o que equivale a menos de 10% do valor mínimo de erosividade para o Curuá-Una. Essa comparação nos mostra a contribuição da alta pluviosidade da região Amazônica nos processos de erosão hídrica e ressalta a importância do uso e cobertura da terra como fator de proteção.

Os mapas de incerteza (Figura 5.13 b, d, f, h & j) mostram que as maiores incertezas estão principalmente onde as coberturas da terra são diferentes de Floresta. Essa variação na estimativa de perda de solo ocorre devido às diferenças de valores atribuídos às coberturas da terra nas duas distintas tabelas de Fator C utilizadas neste trabalho (Tabela 4.7). Isso indica a importância da utilização de tabelas com valores de referências de proteção do solo mais adequados para a realidade de cada região estudada. Entretanto, para a Amazônia não existem valores de referência, sendo necessário fazer adaptações de tabela.

O solo, por sua vez também se destaca nas áreas onde a cobertura é Floresta, mas possuem incertezas na ordem de 10 a 25 t.ha⁻¹.ano⁻¹, sendo que no geral, os lugares nos quais não possuem desmatamento a incerteza é de até 10 t.ha⁻¹.ano⁻¹. As altas incertezas da região do Polo dos Grãos são em sua maioria por conta da questão do uso e cobertura da terra, uma vez que a região possui um relevo plano.

Figura 5.14: Mapas de uso da terra e da estimativa de perda de solo em uma área de pastagem no entorno da cidade de Uruará, na rodovia Transamazônica.



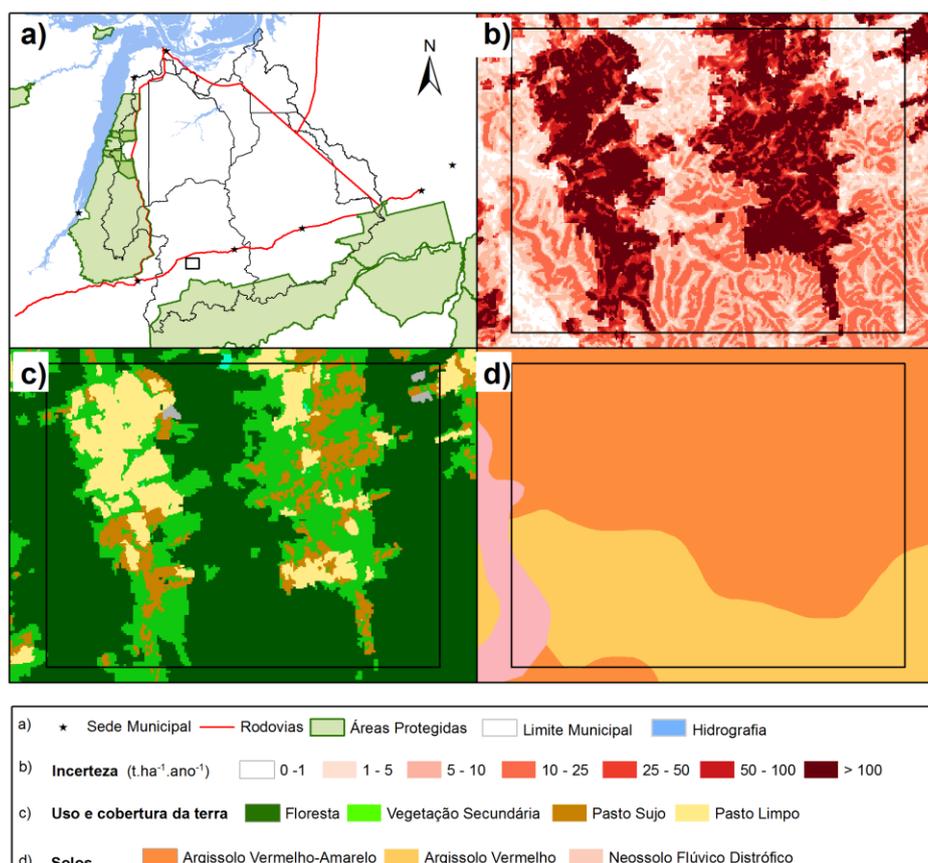
a) Mapa de uso e cobertura da terra de 1984; b) Mapa de uso e cobertura da terra de 2014; c) Mapa de estimativa da taxa de perda de solo de 1984; d) Mapa de estimativa da taxa de perda de solo de 2014; e) Fotos referente à atividade pecuária nos relevos acidentados em Uruará.

Fonte: Produção da Autora.

As maiores incertezas nos municípios de Placas, Uruará e Medicilândia, por exemplo, decorrem além dos fatores associados ao uso e cobertura da terra e

do uso de duas distintas tabelas de referência para o Fator C, das diferentes tabelas de solo (Figura 5.15).

Figura 5.15: Exemplo sobre influência dos fatores em Placas.



- a) Localização da área em zoom; b).Mapa de Incerteza (2014); c) Mapa de Uso e Cobertura da Terra (2014); d) Mapa de solos

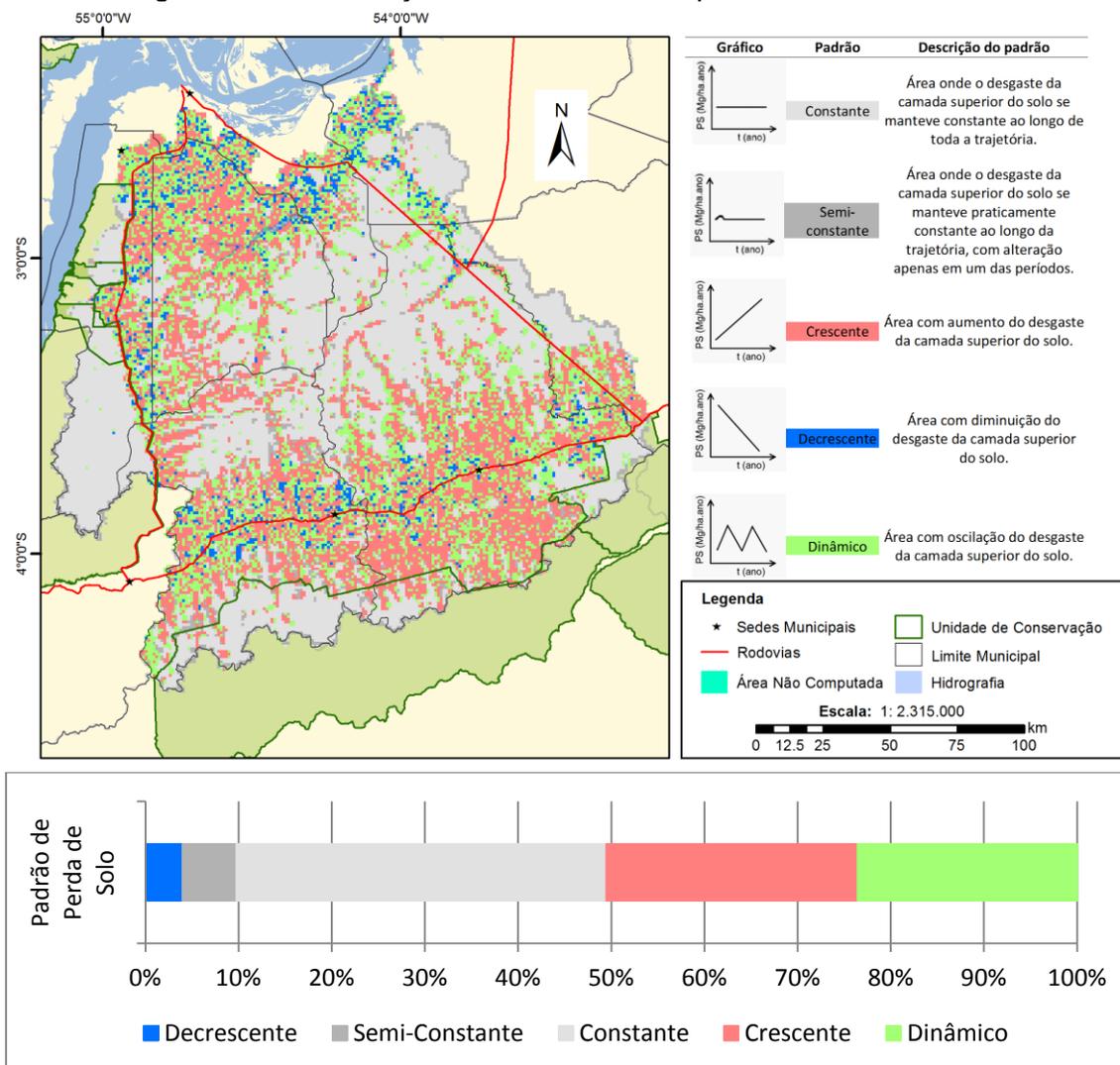
Fonte: Produção da Autora.

4.3.3 Padrões temporais de perda de solo

As trajetórias de perda de solo mostraram-se constantes para 40% da área da bacia e crescentes para 30% (Figura 5.16). Isso significa que em ao menos 40% da bacia a cobertura vegetal se manteve exatamente a mesma em todos os períodos estudados, cuja cobertura predominantemente encontrada foi a cobertura florestal, conforme apresentado na seção 5.2.4. As trajetórias que representaram

os 30% restantes da área são as de perda de solo crescente, que podem apontar o aumento da área desmatada como também a mudança de outros usos e coberturas da terra, como por exemplo, as áreas de Vegetação Secundária que foram convertidas para Pasto Sujo, Pasto Limpo ou Agricultura Anual.

Figura 5.16: Distribuição do Padrão de Temporal de Perda de Solo.



Fonte: Produção da Autora.

Para que uma célula fosse classificada como padrão crescente, o valor da taxa de perda de solo precisaria ter tido um aumento em pelo menos dois intervalos de tempo, como por exemplo, de 1984 para 1990 e de 2008 para 2014. Os

municípios de Mojuí dos Campos, Uruará e Placas apresentaram o maior percentual de células com o padrão crescente, 32%, 31% e 29% respectivamente.

O padrão decrescente foi o menor registrado, em termos de área, para a bacia como um todo e teve seus maiores percentuais em Prainha, e na região do Polo dos grãos (Belterra, Santarém e Mojuí dos Campos). O padrão decrescente, assim como o crescente, é classificado quando é observado um decréscimo das taxas de perda de solos em pelo menos dois intervalos de tempo. Nos dois locais citados, essa redução pode estar associada ao aumento da Vegetação Secundária nos períodos de 1984 a 1990 e 2000 a 2008, como já apresentado na Figura 5.2 (1984) e 5.6 (1990, 2000 e 2008).

Por sua vez o padrão dinâmico aparece disperso na área da bacia, entretanto, próximo de áreas de padrão decrescente fazendo uma transição entre esses dois padrões. Esse padrão pode representar pequenas mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra, que faz como que o aumento da perda de solos, em um período, seja compensado em outro, pela redução desta taxa. Esse padrão dinâmico pode tanto apontar para áreas que foram abertas e abandonadas, como para áreas mais recentes de intensificação do uso e cobertura da terra, em que áreas de vegetação secundária e de pasto sujo, por exemplo, são paulatinamente convertidas para pasto limpo.

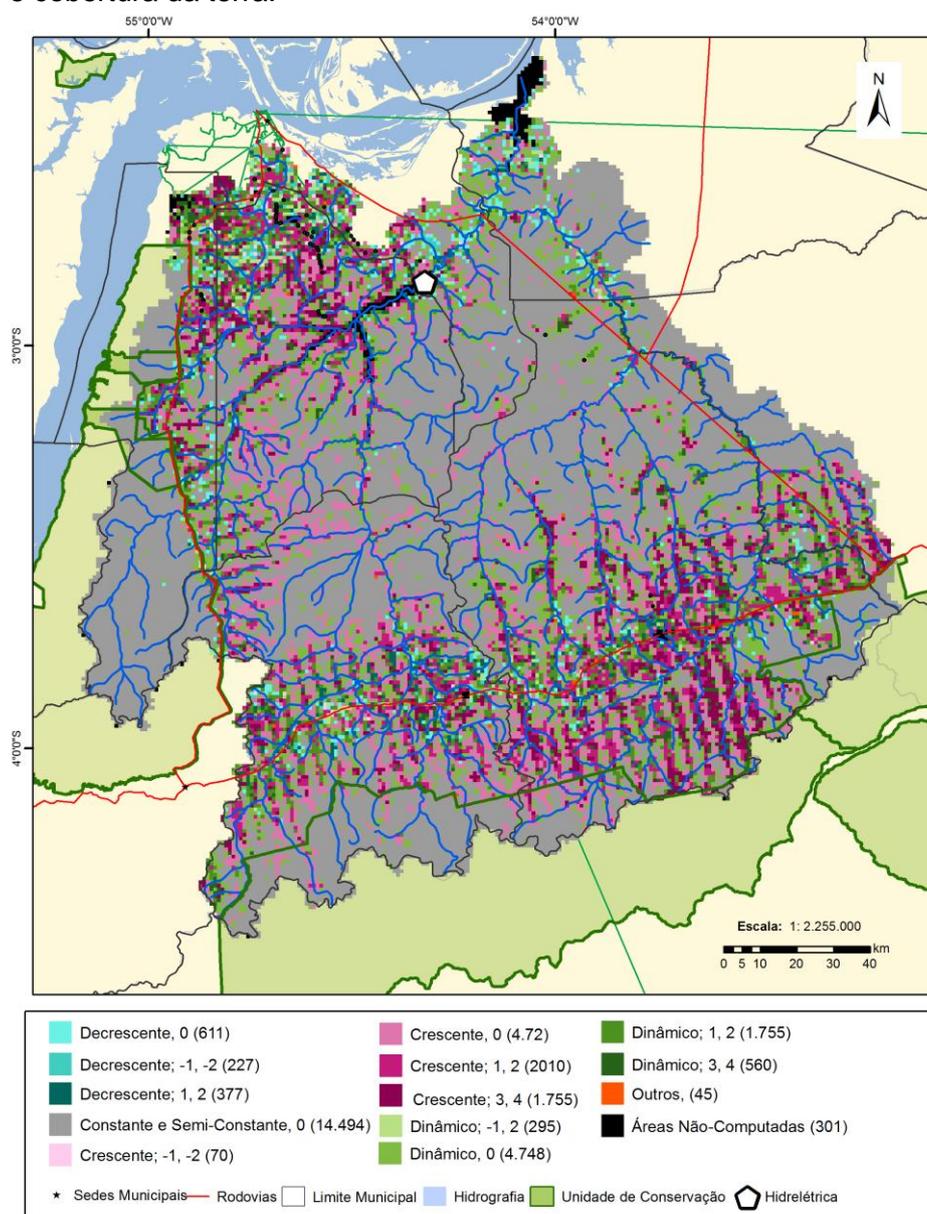
4.4 Análise combinada da trajetória de uso e cobertura da terra e dos padrões temporais de perda do solo

Na análise combinada das trajetórias de uso e cobertura da terra e dos padrões temporais de perda de solo, buscaram-se identificar locais em que as duas dinâmicas estão mais associadas e outros em que outros fatores podem ter tido um peso um pouco maior nos processos de perda de solos.

A Figura 5.17 mostra que o padrão constante (e semi constante) é predominante e está associado majoritariamente às áreas de floresta, que não

sofreram mudanças no período analisado (representadas pelo índice 0), totalizando 14.494 células que correspondem a 45,3%% da área da bacia. As TIs Araras e Cachoeira Seca, onde localizam-se varias nascentes, entre elas a do Curuá-Una, bem como a Flona Tapajós apresentam esse padrão.É importante ressaltar que a TI Cachoeira Seca apresenta ação antrópica e células com padrão crescente, o que indica pressão antrópica nessa região e a necessidade de fiscalização.

Figura 5.17: Análise combinada dos principais padrões de perda do solo e trajetórias de uso e cobertura da terra.



Combinação do padrão temporal de perda de solo (Ex.: decrescente) com a trajetória de mudança de uso e cobertura da terra (Ex.: 0).

Fonte: Produção da Autora.

As trajetórias decrescentes de perda de solo, associadas às trajetórias -2, -1 e 0, ou seja, aquelas que tiveram ganho de vegetação ou que não mudaram, são reduzidas e representaram 838 células (2,6%). Essas trajetórias se concentram

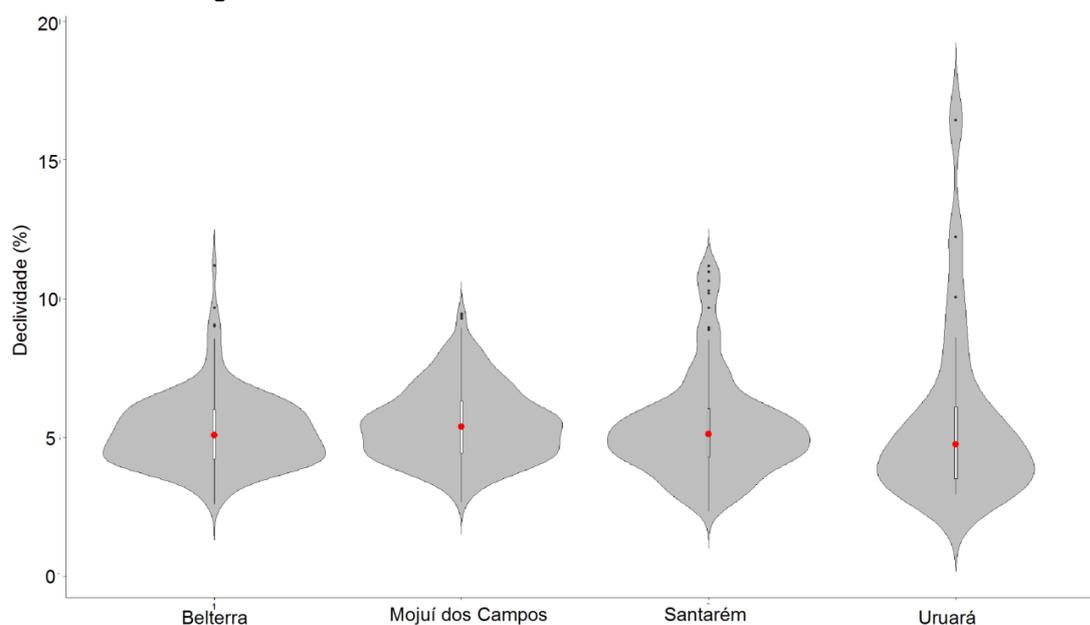
principalmente na porção nordeste e norte da bacia do Curuá-Una, muitas vezes localizadas no entorno de rios e próximas das trajetórias dinâmicas. Essas trajetórias se localizam em áreas de agricultura de pequena escala e extrativistas, em projetos de assentamento do INCRA e comunidades Quilombolas. As trajetórias decrescentes podem estar também associadas a células que apresentaram alguma perda de vegetação (trajetória 1 e 2 – 377 células ou 1,2%). Isso ocorre devido à heterogeneidade das classes de uso e cobertura da terra presentes nas células (1 X 1 km) e a operação escolhida para atribuição das classes às células (classe majoritária).

As trajetórias crescentes de perda de solo associadas com as trajetórias 1, 2, 3, 4 representaram 11,8% das células (3765), uma quantidade expressiva. Essas trajetórias localizam-se principalmente no município de Uruará e na Região do Polo dos Grãos, diferenciando-se entre si quanto à intensidade de remoção de cobertura vegetal. O padrão crescente 1, 2 tem uma característica diferente e representa áreas, por exemplo, onde no início da trajetória havia Vegetação Secundária e ao final, em 2014, apresentou Pasto Sujo. O padrão crescente 4 apresentou áreas que sofreram conversão da floresta para agricultura anual, parte dessas células estão localizadas ao redor da represa da hidrelétrica do Curuá-Una e dos rios tributários da represa. A manutenção da vegetação tem grande importância como proteção para os corpos d'água, sendo inclusive obrigatória por lei. Esses resultados possibilitam indicar áreas prioritárias para fiscalização verificando os parâmetros estabelecidos pelo código florestal para as matas ciliares, como também verificar áreas prioritárias para programas de recuperação da vegetação ao redor dos rios.

Por fim, analisamos separadamente apenas as células que apresentaram Agricultura Anual a fim de conhecer os padrões peculiares à essa classe e identificar áreas com potencial para a expansão da agricultura mecanizada, considerando apenas critérios associado a essas culturas. Os municípios nos quais ocorrem a Agricultura Anual, Belterra, Mojuí dos Campos, Santarém e Uruará, apresentaram um padrão quanto à declividade e tipo de solo. Para

todos os municípios citados a declividade encontrada nas células com Agricultura Anual, apresentaram medianas por volta de 5% e menor do que 8%, a Figura 5.18 mostra, além da mediana, a distribuição da declividade por município. Pode-se observar que as declividades apresentadas na Figura 5.18 apresentam valores máximo como o sugerido por algumas literaturas para indicação de mecanização na agricultura, até 8% (VENTURIERI et al, 2010v1). Quanto ao tipo de solo, o Latossolo Amarelo é o predominante, representando cerca de 90% das células no município (Figura 5.19). Apesar de não ser um solo com alta fertilidade, com as correções necessárias, pode ser apropriado para atividades agrícolas (VENTURIERI et al, 2010).

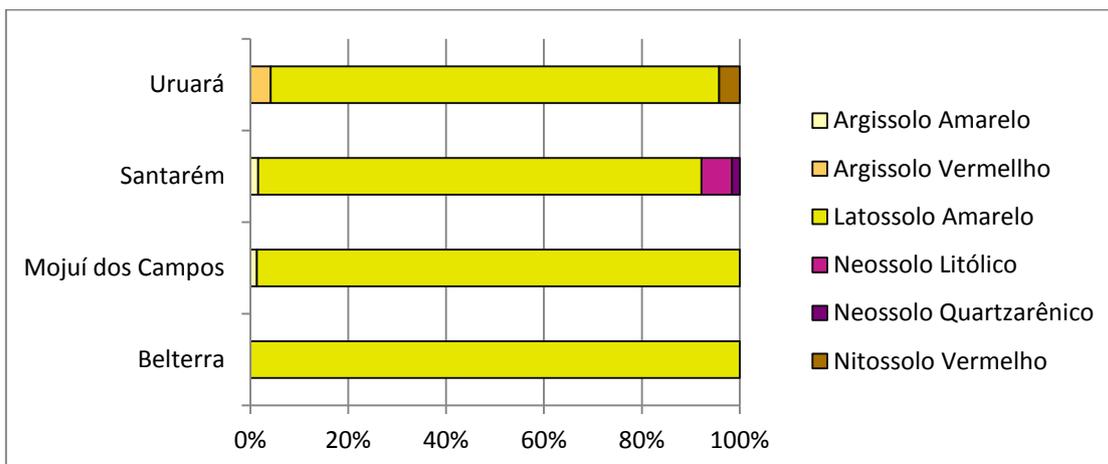
Figura 5.18: Distribuição da declividade por município nas células com área de Agricultura Anual.



A distribuição dos valores medianos da declividade por célula por município

Fonte: Produção da Autora

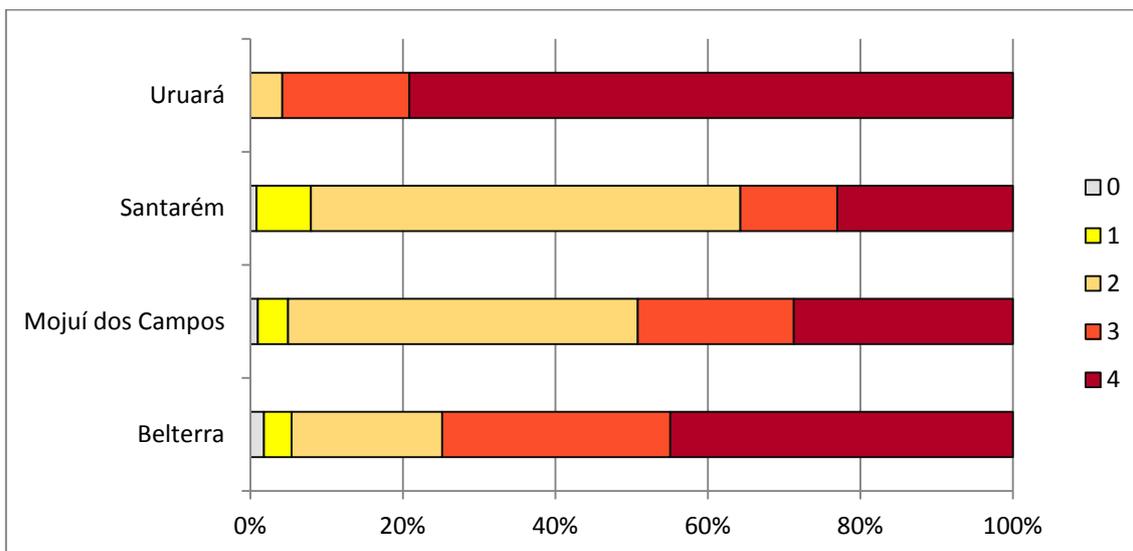
Figura 5.19: Solos das áreas de Agricultura por município



Fonte: Produção da Autora.

No município de Uruará quase 80% das áreas de Agricultura apresentavam cobertura Florestal em 1984 (representadas pela trajetória 4) e em Belterra pouco mais de 40% (Figura 5.20). As trajetórias de uso e cobertura da terra apontam que as áreas de Agricultura Anual, na sua maioria, são áreas que tiveram as maiores perdas de cobertura vegetal, o que significa que essas as áreas foram convertidas a partir de áreas de Vegetação Secundária e Pasto Sujo, principalmente, ou de coberturas que sofreram variações no período estudado.

Figura 5.20: Trajetória de Uso e Cobertura da Terra nas áreas de Agricultura Anual



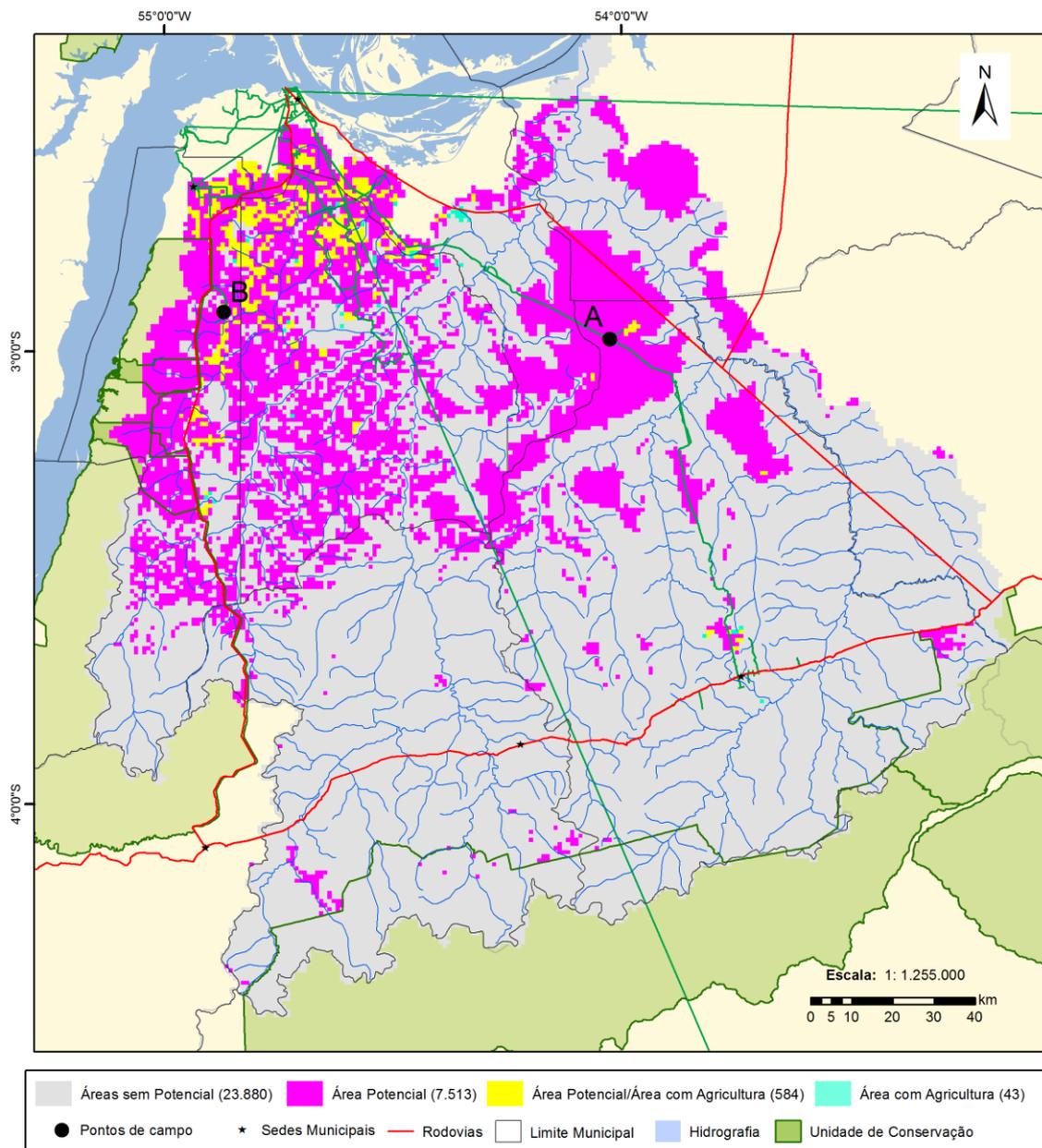
Fonte: Produção da Autora.

Com base nas características do relevo e do tipo de solo apresentadas nas áreas de Agricultura Anual mapeadas nos anos de 2000, 2008 e 2014, mapeou-se áreas potenciais para a expansão agrícola (Figura 5.21). Vale ressaltar que essas áreas possuem várias nascentes e rios, portanto, são áreas nas quais se devem utilizar práticas conservacionistas a fim de conservar esse recurso, de possíveis impactos na qualidade da água, tal como a eutrofização.

As células apresentadas em azul representam as áreas onde observou-se a presença da Agricultura Anual, mas não apresentam os mesmos padrões de relevo e solo das outras áreas, como declividade de até 8% e latossolo amarelo. As células em amarelo, representam presença da agricultura anual, e padrões de declividade e tipo de solo comuns às áreas agrícolas da região. As células *magentas*, por sua vez, representam as áreas com potencial de expansão agrícola que atendem as condições de relevo e de solo das áreas em que esse tipo de agricultura é praticada na região. Durante trabalho de campo em 2017, foram encontradas áreas de Agricultura Anual localizadas nas células identificadas como potencial agrícola por esse estudo. A primeira área

está indicada na Figura 5.21 com letra **A** (Figura 5.22) e fica localizada na PA-370, que é uma estrada não pavimentada, mas em boas condições de conservação, que liga Santarém a Uruará. Em trabalho de campo observou-se também novas frentes de desmatamento ao longo dessa estrada. A segunda área é indicada pela letra **B** na Figura 5.21 e fica localizada em Belterra. Nesta área pode-se observar a presença da agricultura anual e equipamentos de mecanização, conforme apresentados na Figura 5.23.

Figura 5.21: Mapa indicativo de áreas potenciais à expansão agrícola.



Mapa indicativo de áreas potenciais para a expansão agrícola, áreas potenciais já ocupadas pela agricultura e áreas com agricultura, porém que não atende aos dois critérios comuns encontrados para as áreas agrícolas.

Fonte: Produção da Autora.

Figura 5.22: Registros de campo de novas frentes de desmatamento com Agricultura Anual em Uruará 2017.



Fonte: Laboratório LiSS

Figura 5.23: Registros de campo de Agricultura Anual mecanizada em Belterra 2017.



Fonte: Laboratório LiSS

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se contribuir fornecendo uma análise que permitisse avaliar de forma integrada e simultânea trajetórias de mudança de uso e cobertura da terra e padrões de estimativa de perda de solo na bacia do Curuá-Una, localizada na porção sudoeste do Pará, no período de 1984 a 2014. A região compreende uma área de expansão agrícola bastante dinâmica e que apresentou um aumento de sua área desmatada de 237% em 30 anos.

O objetivo geral de estimar a perda de solo na bacia foi atingido, porém, algumas limitações foram apresentadas em relação ao método utilizado, o modelo USLE, principalmente quanto à estimativa dos Fatores K e C, principalmente devido à escassez de dados secundários em resoluções espaciais mais finas. Em geral, para áreas pequenas usam-se dados de amostras de campo (silte, argila, entre outros) para calcular o Fator K, enquanto que para áreas extensas, como para o recorte espacial adotado neste trabalho, não há consenso quanto aos valores, podendo variar significativamente de um local para outro, ou de um autor para outro. Ademais, para a região da Amazônia Brasileira, a maioria dos mapeamentos pedológicos possuem um baixo nível de detalhamento quanto ao tipo de solo, em geral, com escalas mais amplas que 1:250.000, podendo influenciar fortemente nos resultados e em sua precisão. Com relação ao Fator C, os valores descritos na literatura para a região Amazônica divergem entre classes de cobertura com mesma descrição e semântica. Para avaliar essas limitações e as discrepâncias no uso de dados de diferentes fontes de referência foi gerado um mapa de incertezas, que possibilitou mostrar a importância e impacto desses fatores na estimativa de perda de solos, sendo as tabelas de referência para uso e cobertura da terra, as que apresentaram maior discrepância e, portanto, maiores incertezas no modelo.

A análise das trajetórias de uso e cobertura da terra se mostrou eficiente para representar as principais mudanças na cobertura vegetal na resolução espacial de 1x1 km, embora, nessa resolução algumas células tivessem apresentado

heterogeneidade e aparente incoerência com os processos de perda de solos. Isso ocorreu porque as informações foram agregadas no plano celular de formas distintas. Para o uso e cobertura da terra optou-se pelo operador de maioria, enquanto que para a perda de solo foi utilizada a média.

A análise de trajetórias de uso e cobertura da terra possibilitou identificar não apenas as áreas do Polo dos Grãos, as quais apresentaram áreas de conversão de Floresta em Agricultura Anual no período de 1984 à 2014, mas também as trajetórias com Índice 1, que indicam presença de agricultura familiar ou plantação de cacau nas proximidades da rodovia BR-230.

A análise combinada das trajetórias de perda de solo e de vegetação ressaltou a importância da presença de Unidades de Conservação e das Terras Indígenas quanto à manutenção das florestas e, por consequência, para a preservação das nascentes de vários rios, entre eles o Curuá-Una, localizadas na TI Cachoeira Seca. No norte da bacia, onde é concentrada a Agricultura Anual, as drenagens se mostraram sob pressão, com um padrão de perda de solo crescente, com destaque para as áreas próximas da represa Curuá-Una. Esse fenômeno pode implicar, por exemplo, no aumento dos sedimentos na represa, e na eutrofização dos tributários com um possível *bloom* de algas e/ou macrófitas, alterando a qualidade da água e gerando maiores custos para sua remoção e gestão das dragagens.

Neste trabalho desenvolvimento da tipologia de padrões temporais de perda de solo possibilitou indicar os locais em que a perda de solo apresenta diversas dinâmicas, como constante, semi-constante, crescente, decrescente ou dinâmica. Entretanto, não foi possível estimar o quanto efetivamente desses sedimentos chega até os cursos d'água. Assim, sugere-se para trabalhos futuros utilização de modelos que sejam capazes de simular o transporte de sedimentos e não apenas a estimar a taxa de perda de solo, tal como o WEPP, bem como o estudo das mudanças de uso e cobertura da terra nas áreas de APP (Área de Preservação Permanente) com faixas de distâncias em relação à rede de drenagem, segundo critérios estabelecidos na legislação vigente.

Sugere-se também testar outros operadores para a integração dos dados de uso e cobertura da terra no plano celular a fim de representar melhor a heterogeneidade da paisagem estudada, bem como o uso resolução espacial mais fina.

Por fim, o uso e cobertura da terra têm mudado ao longo do tempo na região assim como as taxas de perda de solo. Identificar as áreas que perderam mais cobertura vegetal e os locais onde ocorreram as maiores perdas de solo ou onde as mesmas foram crescentes podem servir como subsídios para ações de ordenamento territorial, que visem à conservação dos recursos naturais, como o solo, a floresta e a água. Essas informações podem ser úteis também para identificação de áreas prioritárias para fiscalização e verificação se legislação ambiental está sendo cumprida, como por exemplo, o art. 4º da lei 12.651/2012, que restringe o uso agrícola mecanizado em áreas de preservação permanente (APP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. Zoneamento ecológico-econômico na Amazônia: questões de escala e método. **Estudos Avançados**, v.3, n.5, p.4-19, jan./abr. 1989.

ADAMI, M.; GOMES, A. R.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; VENTURIERI, A. Dinâmica do uso e cobertura da terra no estado do Pará entre os anos de 2008 a 2012. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 7028-7035. Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM4JJJ>>. Acesso em: 21 dez. 2016.

AGRÁRIA S/A E QUINCÓ. **Soja em Santarém**: um início que entusiasma. Santarém, PA: Agrária, 1997. 31 p.

AGUIAR, C. P. O.; PELEJA, J. R. P.; SOUSA, K. N. S. Qualidade da água em microbacias hidrográficas com agricultura nos municípios de Santarém e Belterra, Pará. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 983-992, dez. 2014 .

AGUIAR, C. P. O.; PELEJA, J. R. P.; SOUSA, K. N. S.; GOCH, Y. G. F.; GUIMARÃES, A. S. Nível de trofia em microbacias hidrográficas sob diferentes usos de solo, na região amazônica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/2LdW5MW>. Acesso em: 04 fev. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidrografia Amazônia Legal**: 1:100.000. 2010. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 10 set. 2016.

ALVES, P. A.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. M. V. Explorando as relações entre a dinâmica demográfica, estrutura econômica e no uso e cobertura da terra no sul do Pará: lições para o Distrito Florestal Sustentável da BR 163. **Geografia**, v. 35, n. 1, p. 165-182, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-30982013000200003. Acesso em: 01 fev. 2018.

AMORIM, R.S.S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 2003. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

ASHRAF, A.; NAZ, R.; A. WAHAB, B.; AHMAD, M.; YASIN, M. Assessment of land use change and its impact on watershed hydrology using remote sensing and SWAT modeling techniques: a case of Rawal Watershed in Pakistan.

International Journal of Agricultural Science and Technology, v.2, n.2, p. 61-68, 2014. DOI: 10.14355/ijast.2014.0302.02.

BARBOSA, A. M. D. S.; MARTORANO, L. G.; COSTA, D. C.; LISBOA, L. S.; NACIF, A. M. P.; PIMENTEL, M. S.. Estimativa do potencial erosivo das chuvas em municípios no entorno a Flona Tapajós, Amazônia. In: SIMPÓSIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA, 2., 2013, Belém, PA. **Anais...** Belém, PA: Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, 2013.

BARRETO, A. M. Posse e propriedade de terras nas áreas de expansão da soja em Santarém e municípios do entorno, no Pará. **Revista Margens Interdisciplinar**, v. 5, n. 6, p.295-308, 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18542/rmi.v5i6.2927>.

BECKER, B. K. **Amazônia: geopolítica na virada do III milênio**. Rio de Janeiro: Garamond, 2004. 172 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 1985. 392 p.

BHATTACHARYA, C. G. A simple method of resolution of a distribution into Gaussian components. **Biometrics**, p. 115-135, 1967.

BINS, L. S.; ERTHAL, G. J.; FONSECA, L. M. G. Um método de classificação não supervisionada por regiões. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 5., 1993. **Anais....** 1993. p. 65-68.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Uso e cobertura da terra na Floresta Amazônica**. 2004. **Disponível em:** http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/uso_e_cobertura_da_terra_na_floresta_amaznica.pdf.

CÂMARA, G.; VALERIANO, D. M.; SOARES, J. V.; MOTTA, M.; MAURANO, L. **Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: INPE, 2013.

CAMPS-VALLS, G.; TUIA, D.; GÓMEZ-CHOVA, L.; JIMÉNEZ, S.; MALO, J. **Remote sensing image processing**. La Porte, CO: Morgan and Claypool, 2011.

CARDOSO, P. V.; COELHO, V. B. N.; BARROS, R. S. Avaliação do modelo de extração de drenagem D8 por compartimentos geomorfológicos. **Revista Continentes** (UFRRJ), ano 4, n.7, p. 93-112. 2015.

CARGILL, J. K. **RE: Agendar visita.** [comunicação pessoal]. Mensagem recebida por Lidiane Cristina Oliveira Costa em 13 out. 2017.

CHAVES, R. R. P. **Tempo de ver o tempo:** histórico da energização e iluminação Curuá-Uma e da CELPA no Interior do Pará. 1995. 101 p. Trabalho (Conclusão de Curso em Administração) - Instituto Santareno de Ensino Superior das Faculdades Integradas do Tapajós, Santarém, PA, 1995.

CONAB. SOJA - BRASIL, **Série histórica de área plantada safras 1976/77 a 2017/18.** Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 23 fev. 2017.

COMBER, A. J. Land use or land cover? **Journal of Land Use Science**, v.3, n.4, p.199 – 201, 2008.

COMBER, A. J. The separation of land cover from land use using data primitives. **Journal of Land Use Science**, v. 3, n. 4, p. 215-229, 2008.

COSTA, L. C. O.; AFFONSO, A. G.; ESCADA, M. I. S. Mudança no uso e cobertura da terra na Amazônia: a dinâmica na bacia do Curuá-Uma (PA), no período de 2004 a 2014. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017.

CÔRTEZ, J. C.; D'ANTONA, A. O. Reconfiguração do meio rural no oeste do Pará: uma abordagem multiescalar da mobilidade e distribuição da população, e da mudança no uso-cobertura da Terra." In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 5., 2010, Florianópolis. **Anais...** Disponível em: <http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT14-376-907-20100903222640.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS CPRM. . **Atlas pluviométrico do Brasil.** 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html> . Acesso em: 15 fev. 2016.

CREPANI, E.; DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. O. Digital processing of Landsat-5 TM data for land use land cover regional mapping. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT: INFORMATION FOR SUSTAINABILITY AND DEVELOPMENT, 29., 2002, Buenos Aires, Argentina. **Proceedings....** Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, 2002. p. 377.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, Instituto de Geociências, 1999.

DAL'ASTA, A. P.; SOUZA, A. R.; PINHO, C. M. D.; SOARES, F. R.; REGO, G. F. J.; SIQUEIRA, J. M.; ESCADA, M. I. S.; BRIGATTI, N.; AMARAL, S.; CAMILOTTI, V. L.; DÓRIA, V. E. M.; COSTA, L. C. **As comunidades de terra firme do sudoeste do Pará: população, infraestrutura, serviços, uso da terra e conectividades. expedição de campo 2013. versão atualizada**. São José dos Campos: INPE, 2017. 209 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3PAAHQ5>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.18.18.41-RPQ). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PAAHQ5>>.

D'ANTONA, Á. D. O.; DAGNINO, R.S; BUENO, M.C.D. Distribuição da população e cobertura da terra: o lugar das áreas protegidas no Pará, Brasil em 2010. **Revista Brasileira de Estudos de População**, p. 563–585, 2015.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G.A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil Water Conserve**, v. 51, p.427–33, 1996.

ELETROBRAS. **Usinas hidrelétricas: descrição das usinas hidrelétricas no Estado do Pará**. Disponível em: <http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/para/>. Acesso em: 13 jan. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - AMAZÔNIA ORIENTAL. **Pedologia ZEE BR-163**. 2010. Disponível em: http://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/i3geo/mashups/openlayers.php?temas=p_pedologiazosirgas2000&layers=p_pedologiazosirgas2000&funco=est_wms&mapext=-57.0555,-9.84074,-45.9874,-0.483371&botoes=pan,zoombox,zoomtot,identifica. Acesso em: 17 jul. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TerraClass**. Disponível em: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php. Acesso em: 20 dez. 2016.

ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S.; RENNÓ, C. D.; PINHEIRO, T. F. **Levantamento do uso e cobertura da terra e da rede de infra-estrutura no distrito florestal da br-163**. São José dos Campos: INPE, 2009. 52 p. (INPE-15739-RPQ/824). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/357DD7L>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

FEARNSIDE, P.M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? the case of Brazil's Curuá-Una Dam. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.10, n.4, p. 675-691, 2005. DOI: 10.1007/s11027-005-7303-7.

- FEARNSIDE, P.M. Uso da terra na Amazônia e as mudanças climáticas globais. **Brazilian Journal of Ecology**, v.10, n.2, p. 83-100, 2007.
- FISHER, P.F.; COMBER, A.J.; WADSWORTH, R. Land use and land cover: contradiction or complement. **Re-presenting GIS**, p.85-98, 2005.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO - FUNAI. **Terra indígena**. 2016. Disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>. Acesso em: 17 jan. 2017.
- FURTADO, A. M.; PONTE, F. C. Mapeamento de unidades de relevo do Estado do Pará. **Revista GeoAmazônia**, v. 2, n. 1, 2014.
- GALDINO, S. **Estimativa da perda de terra sob pastagens cultivadas em solos arenosos da bacia hidrográfica do Alto Taquari – MS/MT**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000872767>>. Acesso em: 16 jun. 2017.
- GAVLAK, A.; ESCADA, M. I. S. Prática com o plug-in de preenchimento de células do TerraView. In: OFICINA DE INTERCÂMBIO INPE, CEDEPLAR/UFMG E FEA/USP, 2010, São José dos Campos. **Anais...** 2010.
- GREENPEACE; SINDICATO DOS TRABALHADORES E TRABALHADORAS RURAIS DE SANTARÉM; PROJETO SAÚDE E ALEGRIA; SINDICATO DOS TRABALHADORES RURAIS DE BELTERRA. **Mapeamento comunitário dos impactos da soja em Santarém e Belterra**. Santarém, 2009. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/mapa-participativoinedito-exp/>. Acesso em: 21 out. 2016.
- GUERRA, A. T; SILVA, A. S.; BOTELHO, R.; GARRIDO, M. **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. [S.l.]: Bertrand, 2010.
- HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, v.25, n.15, p.1965-1678, 2005.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2000**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2000/. Acesso em: 26 jan. 2017.
- _____. **Limite político administrativo municipal**. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>. Acesso em: 26 jan. 2017.
- _____. **Setor censitário**. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>. Acesso em: 26 jan. 2017.

_____. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**: 2004; 2010; 2014. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam>>. Acesso em: 07 set. 2016.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - (ICMBio). **Unidades de conservação**. 2016. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros>. Acesso em: 06 fev. 2017.

_____. **Floresta Nacional do Tapajós**. 2017. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/flonatapajos/> . Acesso em: 26 fev. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites**. 2008. Disponível em: http://www.obt.inpe.br/deter/metodologia_v2.pdf. Acesso em: 23 dez. 2016.

_____. **Monitoramento da floresta amazônica por satélite**: projeto Prodes, São José dos Campos: INPE, 2013. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index/html>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

_____. **PRODES**: Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia por Satélite. 2015. Disponível em: http://www.obt.inpe.br/prodes/metodologia_TaxaProdes.pdf. Acesso em: 02 nov. 2016.

JARDIM, A. C.; OLIVEIRA, J. R. F.; ROSIM, S.; MONTEIRO, A. M. V. Melhorando os algoritmos para extrair redes de drenagem do modelo de elevação digital: o cálculo da área de contribuição. In: WORKSHOP DOS CURSOS DE COMPUTAÇÃO APLICADA DO INPE, 14., 2014, São José dos Campos. **Resumos...** São José dos Campos: INPE, 2014. On-line. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3HBR37S>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598 p.

JUNK, W.J.; MELLO, J. A. S. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 8, p. 126-143, 1990.

LEMOS, M. C.; ROOD, R. B. Climate projections and their impact on policy and practice. **Wire's Climate Change**, v.1, p.670-82, 2010.

LEPERS, E. et al. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000. **BioScience**, v. 55, n. 2, p. 115-124, 2005.

LIMA, S. R. M.; BLANCO, C. J. C.; GOMIDE, I. D. S.; BARBOSA, A. J. S.; FURTADO, M. G. Análise do fator de erosividade da chuva para uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 6, n. 2, p.184-191, 2014.

LINHARES, C. A. **Influência do desflorestamento na dinâmica da resposta hidrológica na Bacia do Rio Ji-Paraná/RO**. 2006. 217 p. (INPE-13778-TDI/1052). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.06.13.50>>. Acesso em: 12 maio 2016.

LISS. Laboratório de Investigação em Sistemas Socio-Ambientais - Sistemas Urbanos, Dinâmicas de Uso e Cobertura da Terra, Saúde&Ambiente. **Fotos de campo**. 2017

LOMBARDI NETO F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3., 1980, Recife PE. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1981

LOMBARDI NETO, F. et al. Potencial de erosão das chuvas no estado de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3, 1980, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1980. fl.13-A.

MARINHO WEILL, M. D. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I-estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.801-814, 2008.

MAEDA, E. E. **Influência das mudanças do uso e cobertura da terra no escoamento superficial e produção de sedimentos na região da bacia do alto rio Xingu**. 2008. 104 p. (INPE-15234-TDI/1321). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnK2Y/T5GMD>>. Acesso em: 10 mar. 2017

MANNIGEL, A.R.; PASSOS, M.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.24, p.1335-1340, 2002.

MARTORANO, L. G.; LISBOA, L. S.; VILLA, P.M.; MORAES, J. D. S.; Fragilidade das terras pelo processo erosivo das chuvas em áreas antrópicas e declivosas na Amazônia legal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 36., 2017, Belém, PA. **Anais...** Belém, PA: SBCS, 2017.

MEDEIROS, G. O. R. **Diagnóstico da erosão e a expansão da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2016. 277 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.29.19.24-TDI). Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LUS58L>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

MEDEIROS, G. O. R. et al. Estimates of annual soil loss rates in the State of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, 2016a. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v40/1806-9657-rbcs-40-e0150497.pdf>>. Acesso em: 19 dez 2016.

MEDEIROS, G. O. R. et al. Diagnosis of the accelerated soil erosion in São Paulo State (Brazil) by the soil lifetime index methodology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, 2016b. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v40/1806-9657-rbcs-40-e0150498.pdf>>. Acesso em: 19 dez 2016.

MEYER, W. B.; TURNER, B. L (Eds.). **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

MELLO, C. D.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; Norton, L. D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202, p. 88-102, 2013.

MELO, A. M. Q.; BLANCO, C.J.C. . Análise da distribuição espacial da erosividade das chuvas no Estado do Pará. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSEDIMENTOLOGIA, 2015, Porto Alegre, RS. **Anais...** 2015.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D.; ROSA, A. N. D. C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B. D.; BAPTISTA, G. M. D. M.; BRITES, R. S. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Ottobacias**. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: 23 fev. 2018.

MOORE, I. D. et al. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3-30,1991.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Extração automática de drenagem: uma análise comparativa a partir de diferentes ferramentas e bases de dados. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n. 6, p. 1849-1860, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233860>. Acesso em: 07 fev. 2018.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: UFV, 2007.

MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI (MPEG). O Curuá-Una e o impacto de uma nova represa. **Destaque Amazônia**, .n.4, p.5, fev. 1985.

NERES, A. T.; PREIRA, I. C. N. Análise da dinâmica da paisagem em Belterra (PA) no contexto da agricultura mecanizada: mudanças e processos. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 10. **Anais...** Vitória - ES, 2013.

NEVES, S. M. A. S.; NUNES, M. C. M.; NEVES, R. J.; SOARES, E. R. C. Estimativa de perda de solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Jauru/MT. **Sociedade & Natureza**, v.3, p. 423-434, 2011. Disponível em: <http://www.redalyc.org/html/3213/321327203006/>. Acesso em: 03 fev. 2018.

NUNES, J.G.; CAMPOS, M.C.C.; NUNES, J.C.; MANTOVANELLI, B.C.; CUNHA, J.M.; SOARES, M.D.R.. Aplicação da equação universal de perdas de solo na região sul do Amazonas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v.15, n.2, p.548-557, 2017.

OLIVEIRA, A. M. M. D. et al. Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de geotecnologias e modelo predictivo. **Estudos Geográficos**, v. 5, p. 63-86, 2007.

OLIVEIRA, K. D. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu Utilizando o Modelo DHSVM**. 2014. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

OLIVEIRA, R.; ALMEIDA, R.H.C.; REBELO, G.H.; RODRIGUES, M.; BARROS, B.; MAGALHÃES, J.; GAVINA, J.L.; FORLINE, L. Avaliação sócioambiental da população humana do entorno da UHE Curuá-Una-Santarém/PA. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., 2003. **Anais...** 2003.

OLIVER, J. E. Monthly precipitation distribution: a comparative index. **The Professional Geographer**, v. 32, p. 300-309, 1980.

OLIVETTI, D. **Modelagem temporal e espacial da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Caçús**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Tecnologia Ambiental 2014) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2014.

PARÁ. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Classificação climática do Pará (Método de Köppen)**. Disponível em: www.sema.pa.gov.br/download/classificacao_climatica_do_para.doc. Acesso em: 15 dez 2016.

PARANHAS, F.A.C.; FIORI, A.P.; DISPERATI, L.; LUCCHESI, C.; CIALI, A.; LASTORIA, G. Avaliação multitemporal das perdas dos solos na Bacia do Rio Taquarizinho através de SIG. **Boletim Paranaense de Geociências**, v.52, p.49-59, 2003.

POMPERMAYER, R. C. **Modelagem hidrológica**: técnicas de geoprocessamento aplicadas ao modelo SCS Soil Conservation Service Curve Number. 2013. Tese (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG), Belo Horizonte, 2013.

PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água**: práticas mecânicas para o controle da erosão. Viçosa: Editora UFV, 2009. 279p.

QUINLAN, J.R. **C5.0**: an informal tutorial. Disponível em: <<https://www.rulequest.com/see5-unix.html>>. Acesso em: 13 jan. 2018.

QUINLAN, J.R. Induction of decision trees. **Machine Learning**, v.1, n.1, p.81-106. 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1022643204877>. Acesso em: 13 jan. 2018.

Ranzani, G. Erodibilidade de alguns solos do Estado do Amazonas. **Acta Amazonica**, v.10, n.2, p.263-9, 1980.

RENARD, K.G.; FREIMUND, J.R. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. **Journal of Hydrology**, v.157, p.287-306, 1994.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J., WATERLOO; M. J. HAND: a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.9, p.3469-3481, 2008.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Paulo: EESC/USP, 1998. 840p.

ROCHA, G. C. **Aplicação da estimativa espaço-temporal da tolerância à perda de solo no planejamento do uso da terra**. 2013. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-26072013-091837/pt-br.php>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

RODRIGUEZ, D.A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, v.61, n.10, p.1831-1846, 2016.
Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667.2015.1051979>. Acesso em: 16 maio 2016.

ROSIM, S.; OLIVEIRA, J.D.; JARDIM, A.C; NAMIKAWA, L. M.; RENNÓ, C. D. TerraHidro: a distributed hydrology modelling system with high quality drainage extraction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, APPLICATIONS, AND SERVICES, 5., 2013. **Proceedings...** 2013. p. 161-167.

SANTOS, D. B. O. **Aplicação da RUSLE a uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

SARÉ, A. R. **Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Una, Pará**. 2003. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3.ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. 560 p.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SHIMABUKURO, Y.E.; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C.; DUARTE, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 1997. 16 p. (INPE- 6147-PUD/029).

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, n. 57, p. 251-259, 2004.

SILVA, R. S. V. **Integração de temas ambientais na caracterização da ecorregião aquática Xingu Tapajós, Amazônia Brasil**. Dissertação. (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

SILVA, A.M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. **Geociências**, v.24, n.1, p.33-41, 2007.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A.; WATANABE, C. H. Natural potential for erosion for Brazilian territory. InTech, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/soil-erosion-studies/natural-potential-for-erosion-for-brazilian-territory>.

SILVA, G. B. S.; PEREIRA, K. C.; FARIA, D. P.; SOUZA, L. C. N.; NOGUEIRA, S. F. Mapeamento de classes de declividade da sede do Polo Regional de Desenvolvimento Tecnológico dos Agronegócios do Vale do Paraíba, em Pindamonhangaba (SP). In: SYMPOSIUM SOCIEDADE DE ESPECIALISTAS LATINO-AMERICANOS EM SENSORIAMENTO REMOTO, 2012, Cayenne. **Anais...** Cayenne, Guiana Francesa, 2012. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74516/1/Bayma.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2016.

SIMÕES, H; FERNANDEZ, P. Comparação de métodos de cálculo do fator topográfico (LS) da Equação Universal de Perda do Solo (EUPS). IN: ENCONTRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 4., 2013. **Anais...** 2013. p.64-5.

SOUZA, A. R. **Economia e natureza: padrões de uso e cobertura da terra associados a atividades agropecuárias e extrativistas de comunidades do Sudoeste do Pará.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2016.

SOUZA, A. R.; ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. M. V. Padrão da paisagem associado ao uso e cobertura da terra em comunidades ribeirinhas e de terra firme situadas no sudoeste do Pará. **Geografia**, v. 42, n. 2, p. 135-164, 2017.

SOUZA, J. O. P.; ALMEIDA, J. D. A. M. Modelo digital de elevação e extração automática de drenagem: dados, métodos e precisão para estudos hidrológicos e geomorfológicos. **Boletim de Geografia**, v.32, n.2, p. 134-149. 2014.

SOUZA, A. R; ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. V. M. Padrões da paisagem e tipologia de atividades produtivas: uma análise integrada baseada em dados de sensoriamento remoto, métricas da paisagem e dados de produção local. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos, SP. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017.

TAGLIARI, P.D. **Perdas de solo e mercúrio em diferentes usos e manejos da terra na região do Baixo Tapajós.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TOLEDO, M. Os processos de modernização agrícola na região amazônica: transformações recentes na dinâmica produtiva do município de Santarém (Pará). **Geosul**, v.26, n.52 p.77-98, 2011.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Orgs). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p11-24.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat: Earth observation satellites** (ver. 1.1, August 2016). 4 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>. Acesso em: 26 jan. 2017.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.

VENTURIERI, A.; MONTEIRO, M. A.; MENEZES, C. R. C. **ZEE: zoneamento ecológico-econômico da zona oeste do Estado do Pará: v.1: diagnóstico socioambiental**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.

VENTURIERI, A.; MONTEIRO, M. de A.; MENEZES, C. R. C. **ZEE: zoneamento ecológico-econômico da zona Oeste do Estado do Pará: v. 2: gestão territorial: diretrizes de uso e ocupação**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2010a.

WALKER, R.T.; HOMMA, A.K.O.; CONTO, A.J.; CARVALHO, R.D.A.; FERREIRA, C.A.P.; SANTOS, A.I.M.; ROCHA, A.C.P.N.; OLIVEIRA, P.M.; RODRIGUES PEDRAZA, C.D. **As contradições do processo de desenvolvimento agrícola na Transamazônica**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1997.

WISCHMEIER, W. H. E.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**. Washington: United States of Department of Agriculture, 1965.

WISCHMEIER, W. H. E.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: United States Department of Agriculture, 1978.